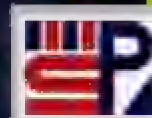
欢姆社学习漫画

漫画 半导体

〔日〕涉谷道雄 / 著
〔日〕高山ヤマ / 漫画绘制
〔日〕株式会社TREND-PRO / 漫画制作
滕永红 / 译





科学出版社
www.sciencep.com

KindleDX出版署

前言

我想，很多读者一看到《漫画半导体》这个书名肯定会认为它是一本极其简单的入门图书。

总的说来，本书是想从物理学（物性工学）的角度来解释说明半导体的性质以及它是如何被活用到电子电路中去的。似乎现在很多解说半导体的入门书，都在着重讲解那些应用于身边的电子产品上的电子技术，而不是着眼于分析半导体材料所拥有的性质。

结果，读者感觉到好像只理解了表面知识，而再想要向更深层次研究和探索的话，却缺乏一定的基础能力。本书的内容并不仅仅是单纯的杂学知识的罗列，它包含了更深层次的知识，以此来进一步地激起读者的求知欲。

现在，半导体在工业上已经实现了批量化生产，我们的身边随处可见。但是，并不是利用半导体所产生的一切现象都能够从理论上解释清楚。不过，量子力学和固体物理学之前已经说明了很多关于半导体的现象，并且作为衍生新创意的理论背景取得了巨大的成功。

本书尽可能避免入门图书中常出现的简单的比喻说词，而是在力所能及的范围内去解说有利于真正理解现实物质所必需的概念。

构成物质的原子是如何连接起来的？物质中的电子是如何传输电流的？我想通过了解这些现象的相关知识，就应该能够明白半导体的真正含义了。

2010 年 4 月

涉谷道雄

目 录 CONTENTS

序　章

我、女佣和咖喱饭







我在这儿！
小丰。
快点！
我来啦……



等一等！
……叮咚
叮咚
打呵欠



叮咚
……
羽户丰


谁啊？
这么早……
咔


初次见面！
我叫奈园芽衣！
您好
奈园芽衣




是您父亲叫我来……
照顾您的……
算了吧，
瞎扯什么呀！


你年龄那么小！
你才多大？
竟敢说照顾我？
还不如我们
下次开始约
会吧……
哎呀！
讨厌死了！


这是您父亲
交给我的！


是信吗？

小丰，你还好吗？
非常抱歉，我不能常回家陪你！你一个人一定感到很寂寞、无聊，日子过得很辛苦吧。因此我决定给你雇用一个女佣人来照顾你，她以后也会住在我们家，和她好好相处吧！
哈哈！！！

爸爸怎么这样，竟然自作主张！

……










好了，
请用吧！
哇，咖喱饭！


并且，这个
味道……


是妈妈的
味道！！


竟然和我过世的妈
妈做的咖喱饭的味
道一模一样……


我可以在你吃饭的
时候去收拾一下厨
房吗？
啊？


虽然我一直都极力
避免打扫屋子，但
是似乎和母亲在一
起的记忆也慢慢地
淡去了。
嗯……

这个孩子……
很奇怪，我一点都不讨厌他……
好！我一定会努力做好我的工作！
并且，有女佣人服侍的生活也不见得很坏。
这是什么？全都是和女孩子在一起拍的照片！
并且，手机上也都是女孩子的联系方式！
你不要随便动我的东西，那是我的隐私！
啪

第 1 章

什么是半导体

1 什么是半导体



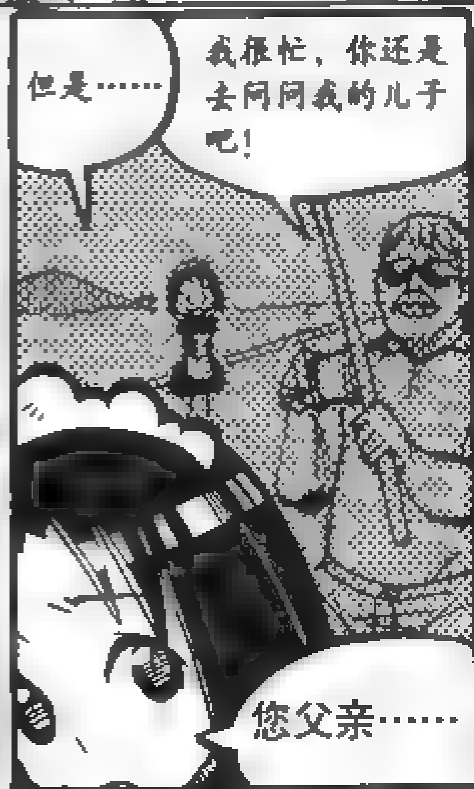
我回来啦！



少爷！
请你教我有关半导体的知识吧！



啊？为什么突然提这样的要求？
我以前一直就很想了解有关半导体的知识啊！



但是……
我很忙，你还是去问问我的儿子吧！
您父亲……



这个老头子，尽给我找麻烦。
您父亲满脑子装的都是半导体的事。


半导体是什么？
是美妙的声音……
啦
啦


没办法！
好吧！
哇，太好了！
补课……多么美妙的声音啊！

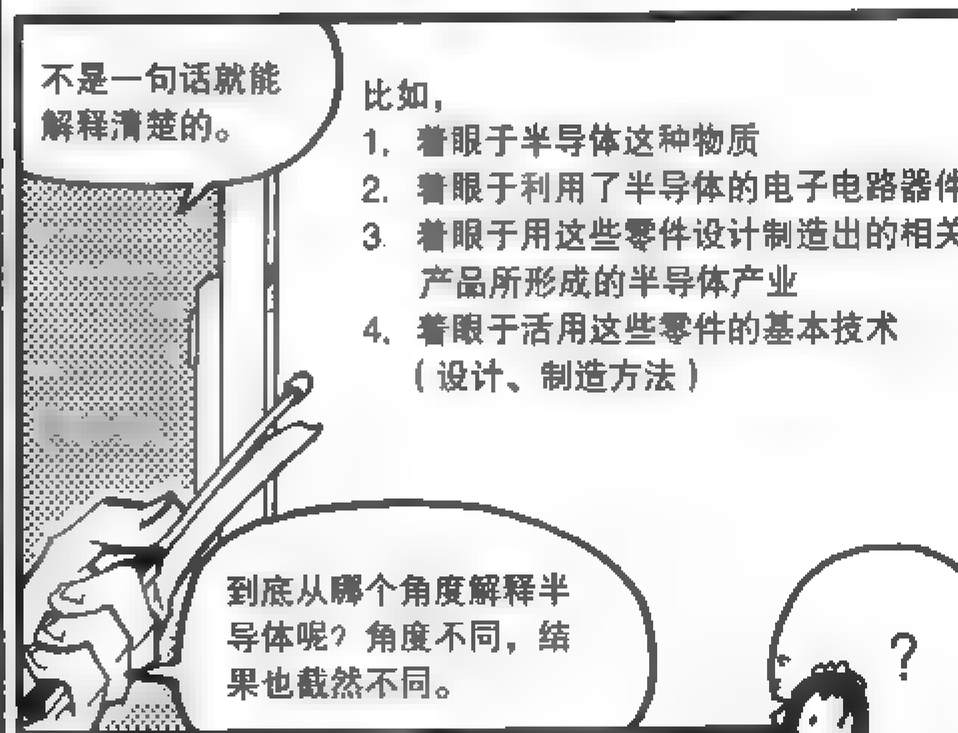

你不要误解它的意思啦……
那你就给我单独补补课吧！
哇噢——！


补课？

● 从何处着眼


那么，


半导体
半导体到底是什么？


不是一句话就能解释清楚的。
比如，
1. 着眼于半导体这种物质
2. 着眼于利用了半导体的电子电路器件
3. 着眼于用这些零件设计制造出的相关产品所形成的半导体产业
4. 着眼于活用这些零件的基本技术（设计、制造方法）
到底从哪个角度解释半导体呢？角度不同，结果也截然不同。
？


那么，到底从哪个角度入手才能对半导体有一个正确的理解呢？
不，哪个和半导体都有关系。不过，怎么说好呢……


● 导体和绝缘体
查字典的时候，
能看到"导体（能够让电流通过的物体）"和"绝缘体（不能让电流通过的物体）"
这两个词，比如像铜和铝这样的金属就属于导体，而像陶瓷、空气、水泥等都是绝缘体。
半导体就是指传导特性位于导体和绝缘体之间的物质。


虽说如此，但我还是想指出"这个定义并不是非常明确"。
哼

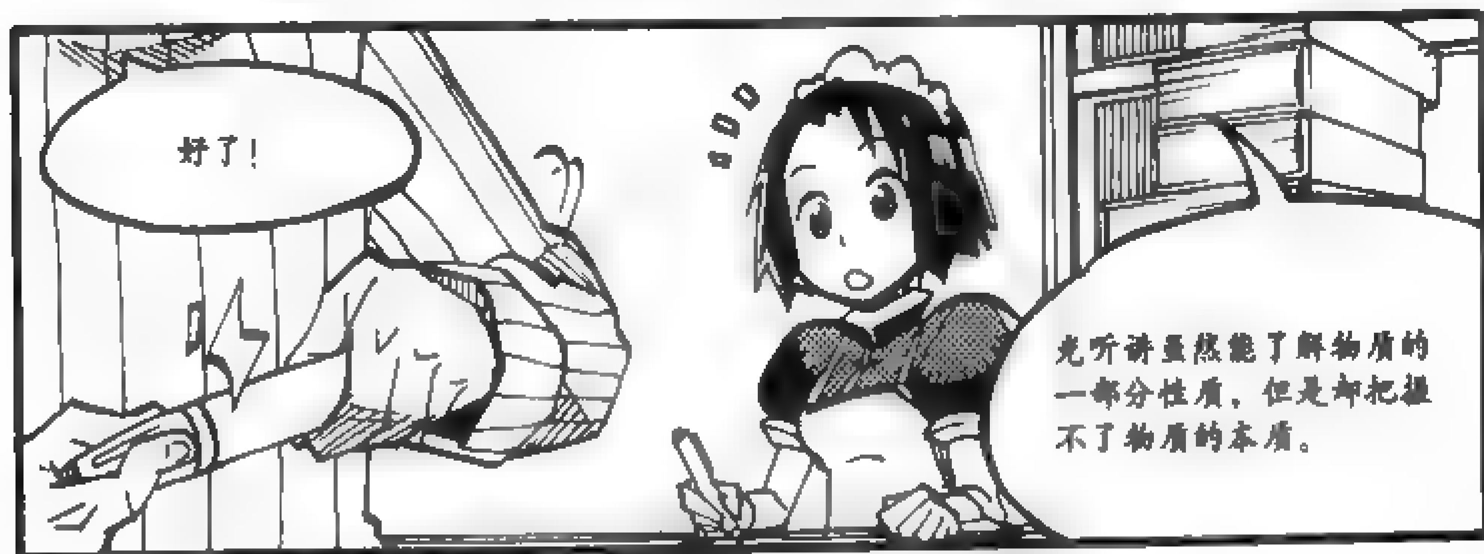

哇…
同时，半导体材料硅如果是纯粹的单晶体，在室温条件下（约20℃）其电阻就会很高，我们可以将这种状态下的硅叫做绝缘体。


并且，
嘭


semiconductor
准 导 体
其实本来不是"半"，而应该是"准"，即准导体。但是在最初翻译的时候它被译成了"半导体"。


Semiconductor
半导体
……


于是，时至今日，它就一直沿用"半导体"这个称呼。
……


好了！
光听讲虽然能了解物质的一部分性质，但是却把握不了物质的本质。


准备一下，我们一起出去吧！
事实证明比理论讲解更重要。


我们一起去半导体王国看看吧！
王……王国？

2 产业之米



电器卖场
你说是说这里……



这不是电器卖场吗？
电视
没错！



半导体被称为“产业之米”
而被广泛应用在家电产品中。
米？



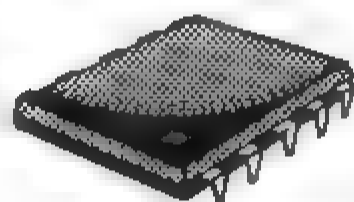
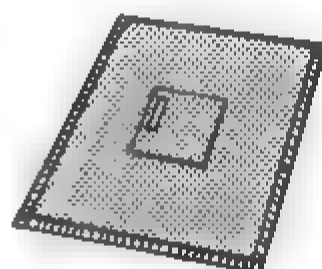
这里也有！
这里也有！
这也是！
这里面也有！



它们都装有半导体。
呼
这个也有？
当然！

● IC


在家电产品中所说的“半导体”大都被称作IC（集成电路）。
IC (integrated circuit)

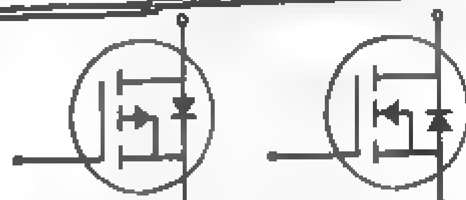
电脑的CPU和存储器也可以用IC这个词来概括。
噢，这样啊。


IC（集成电路）到底聚集了些什么东西？
被聚集的主要器件就是一个又一个的“晶体管”。

● 晶体管

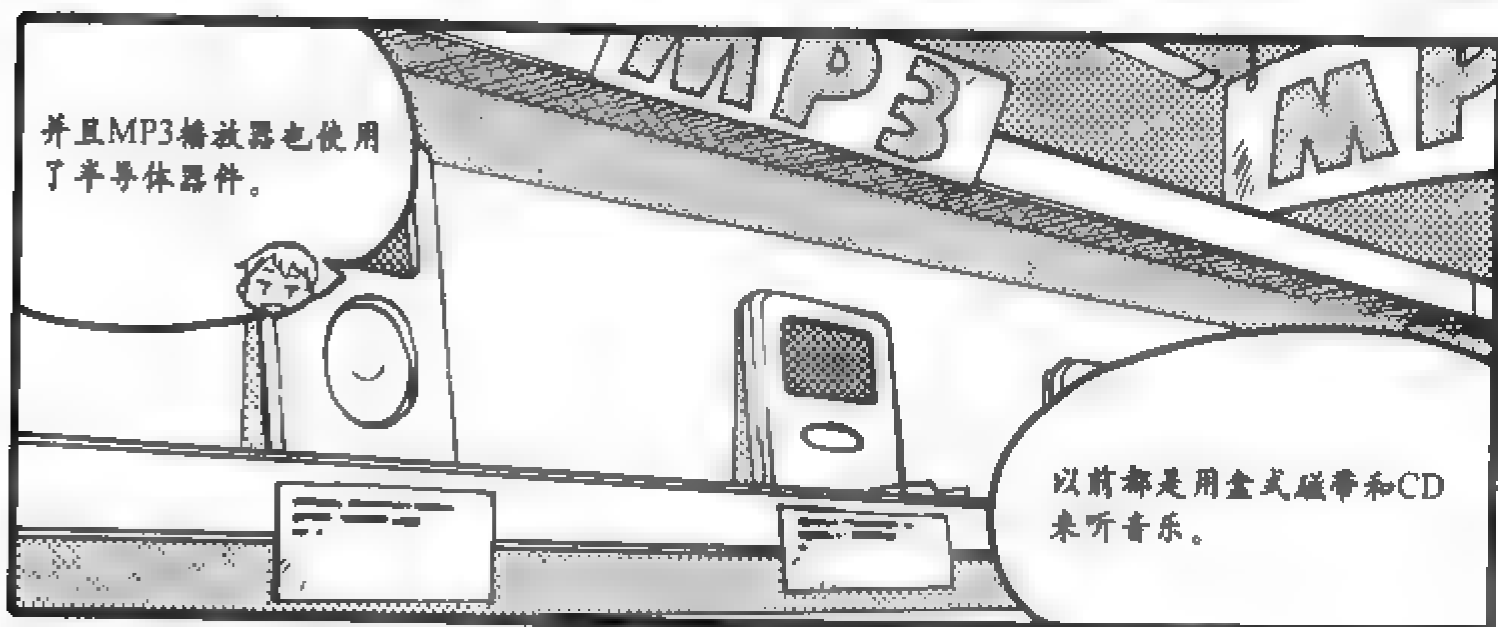
晶体管在最初发展阶段为双极晶体管（bipolar transistor）。


双极晶体管


（MOS-FET）
现在，很多数字IC都是聚集MOSFET而制作的。


并且，电子电路中的电阻器和电容器等元件也可以装入IC中。
比如，


相机 相机 相机
特价
数码照相机，
就是不用胶卷，而是改用半导体器件CCD（电荷耦合器件）和CMOS的图像传感器。
相机 相机


MP3
并且MP3播放器也使用了半导体器件。
以前都是用盒式磁带和CD来听音乐。


但是，现在把音乐数据压缩后存储在半导体存储器中，然后将数据转换成声音信号，这样就能听到音乐了。


打扰一下，这个很方便，我要买一个。
谢谢！
你听我把话说完，行不行啊？

3 高速IC

另外，我已经讲过在使用过程中半导体大都等同于IC。

那么，如何才能提高PC的性能呢？

PC专柜

我不明白你说的意思。

比如，

1．提高计算速度



2．同时增加可计算数（制作成由多个运算电路构成的IC）



就是提高这些性能。

那么，要怎么办才好呢？

因为电子信号的传输速度接近光速，

所以要缩短传输信号的距离。

因此，不仅要缩短IC内部的线路，

而且要将其内部的晶体管缩小。

如果把IC内部的晶体管缩小，就能够在相同大小的材料中制作出多个晶体管。

原来是这样啊！

少爷，您真聪明！









制作晶体管的材料是硅(Si)和锗(Ge)。

Si

Ge

它们都是能够放大电子信号（增强电子信号幅度），可以通过或阻断电流的小型器件。

通过它们能够将弱的电子信号的幅度增强、放大。

这样，就能够把麦克风发出的声音变大，然后用扬声器将声音播放出来。





你在干什么啊?

喂

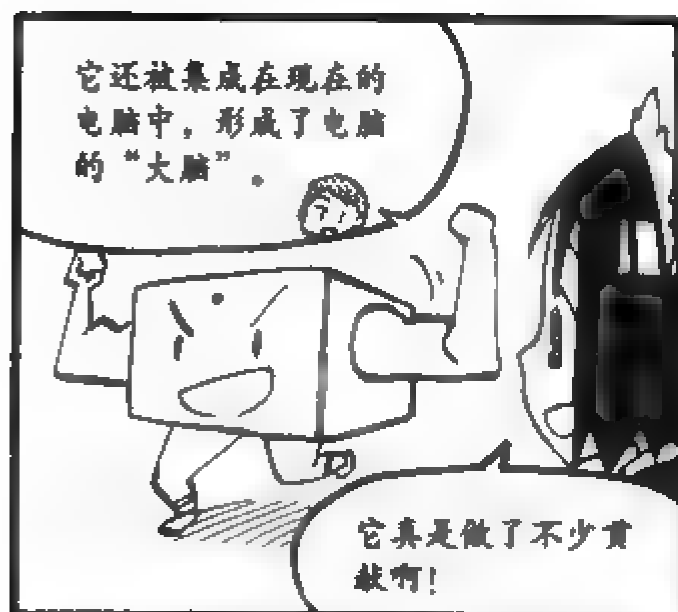
喂

晶体管!

晶体管也是一种具有开关功能的小型器件。它能够通过电压和电流的变化来控制ON / OFF状态，

所以用它制作出了小型计算装置。

这可不是为了让你做恶作剧而发明的!


它还被集成在现在的电脑中，形成了电脑的"大脑"。
它真是做了不少贡献啊！

另外，当时只有双极结构的晶体管，还没有双极晶体管这一称呼。
那么，为什么后来会叫"双极晶体管"呢？

● FET
Field
Effect
Transistor
场效应晶体管
那是因为后来发明了FET。

为了与FET（场效应晶体管）区分开来，才称呼其为"双极晶体管"。
噢！

就好像古典单口相声和新创单口相声一样。
啊
你比喻得还真恰当啊！

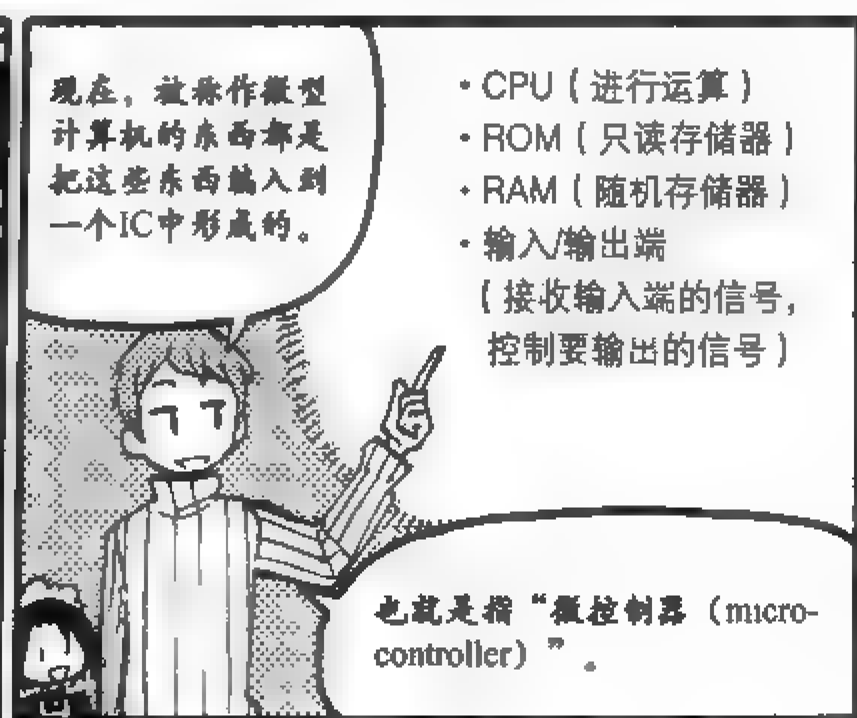
4 与个人电脑无关的IC


有一种电波钟表，它接收到报时专用信号后，
能够同步显示出与报时专用信号一致的时刻。
它的接收信号部位和同步显示信号部位都是依靠IC来实现的。
IC!
真是太令人吃惊了！


呵呵，
这就令你吃惊了？


比如，这个电饭煲，
可以为其设定煮饭开始、煮饭结束的合适温度和时间。
啊，难道这个也……
没错！
都是因为它里面安装了微型计算机。


● 什么是微型计算机
那么，微型计算机到底是什么呢？
哦，进入正题了！


现在，被称作微型计算机的东西都是把这些东西输入到一个IC中形成的。
· CPU（进行运算）
· ROM（只读存储器）
· RAM（随机存储器）
· 输入/输出端（接收输入端的信号，控制要输出的信号）
也就是指"微控制器（micro-controller）"。

以前，我还自己用买来的CPU和存储器组装过计算机呢，我把它叫做“My Computer”。

你还自己组装过计算机啊？

这是父亲的命令，我熬了好几个晚上呢……
呵呵！

另外，要使IC正常地运行，还需要能量支持。

能量源可以是家庭中使用的普通干电池（一次性电池）或充电电池（非一次性电池）。

但是，通常如果直接将IC连接到家庭用的交流电路上，IC会被烧坏。

当然，大多数情况下使用1节干电池，电压会太低，这样IC就不能正常地运行。

于是，就出现了电源用IC。

这就是“电源电路”。

● 电源电路

所谓电源电路是指能够正确控制电压范围以保障各种IC正常运行的电子电路，

电源

电源电路

也是供给IC运行必需电力的电子电路。

这个与IC结合在一起就相当于模拟IC了。

哦！

最近，你是不是经常听到有关环保问题的事呢？

是环保运动 (ecology) 吧！

对！
为此，就要求具备高的能源转换率。

其中具有代表性的就是“转换电源”。

◎将像一节电池那样的低电压转换为高电压
◎将像大型太阳能配电盘那样的高电压转换为低电压

像以上例子所说的情况，在转换电压时需要很高的能源转换效率。

随着IC等技术的进一步发展，小型、大电力、高效率的电源电路便产生了。

这真是一项有利于地球环保的技术啊！

● 二极管

除了IC以外，还有一种半导体器件会被应用于很多场合。

它就是二极管！

我听说过！

蓝色发光二极管，这个名字经常听到嘛！

二极管是只往一个方向传送电流的电子元件，

在把交流电转化为直流电时要用到它

它也叫做整流元件。

例如，
日本新干线的架线电压使用的是25 000V的交流电。
还有，在汽车中
想使用100V的电子产品（比如PC的AC适配器）时，
要使直流电动机运转，必须将交流电转换为直流电。
因此就需要高电压、大电流的半导体整流器。
安装了晶体管和整流元件的“车载逆变器”就能够将汽车上的12V的直流电转换为100V的交流电。

● LED

刚才我们也稍微提了一下，在二极管中也有通电后就能发光的二极管。

一闪一闪

好漂亮啊

那就是LED。

因为混入半导体材料中的杂质不同，所以其发光的波长也不同，由此人们开发出了红、绿、蓝等颜色的LED。

我听说交通信号灯就用的是LED。

缠住了……

嗯！

它是LED中最具代表性的东西。

它通过把高亮度LED做成能够加强其透镜效果的形状，

从而提高其可视性，在白天人们从很远处就能够看见它，这样它的使用一下子就普及了。







其实还远不止这些呢！

接收LED光，将其转变为信号的

“光电二极管”和“光电晶体管”，

也都是半导体产品。

大屏电视

啪

啪

咔

咔

哇！

● 其他半导体产品

还有为环保（减少二氧化碳排放量）做出重大贡献的半导体零部件的主导产品……

太阳能电池！

它也是以半导体材料硅为原料制作而成的。

哇噢，

就是通常被装在屋顶上的那个东西吧！

另外，银行等机构推行使用的手掌静脉识别系统也利用了半导体技术。

用途竟然如此广泛，真是高新科技啊！

啊，你这么一说，我想你应该把……

安装了半导体材料的电子零部件产品搞清楚了。

在我们身边随处都是。









温故而知新嘛！

请不要忘记温故而知新的精神哦！

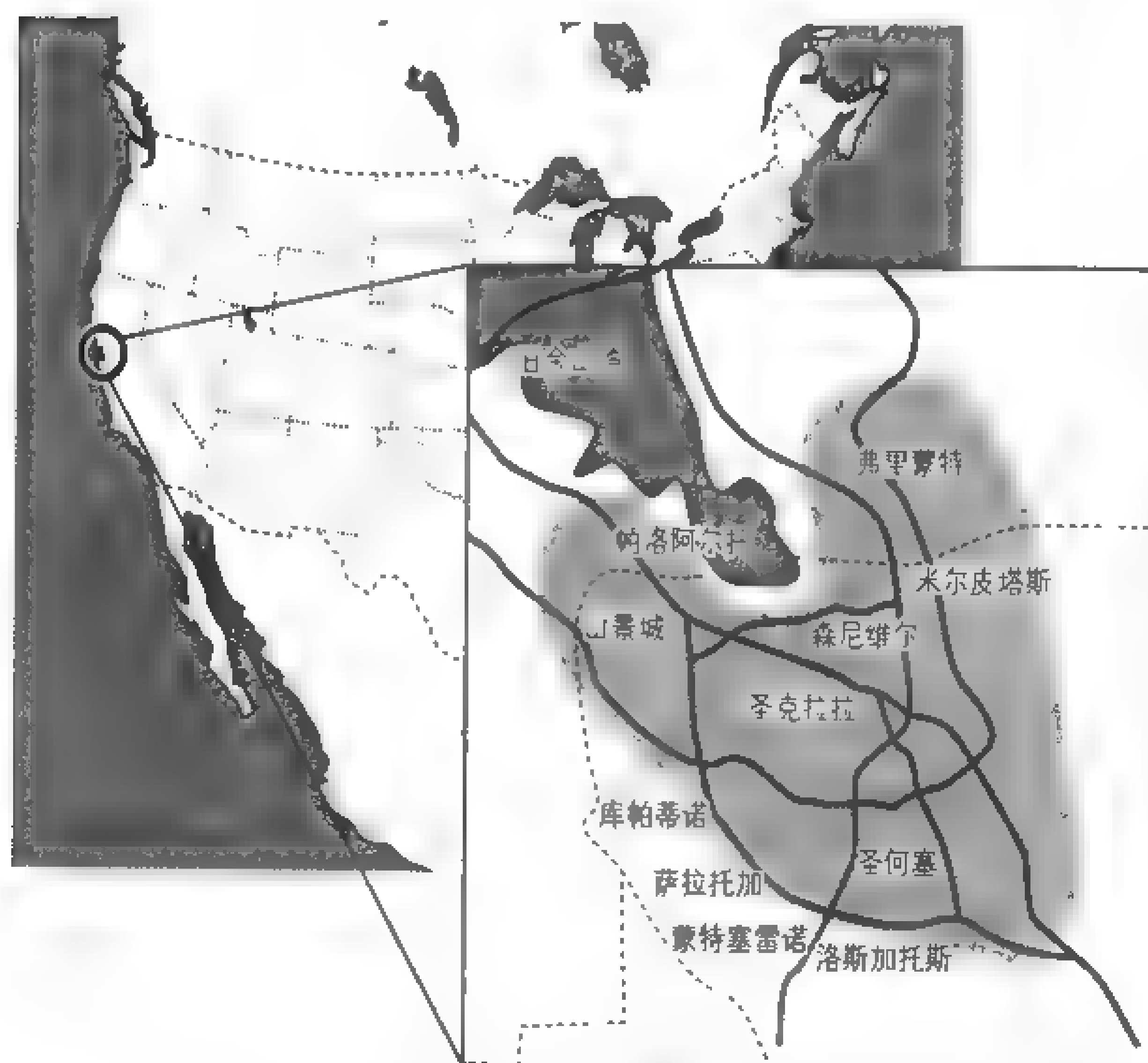


5 后 续

硅谷发祥地

硅是半导体材料的代表性物质。因此，美国加利福尼亚州半导体产业聚集的地区就被称为“硅谷”。

这片硅谷地带在旧金山东南约80公里的地方，它以位于旧金山湾的东南端的圣何塞（San Jose）市为中心，包括了其周边的几个市、镇，这里从地形上看并非山谷。



● 图1-1 硅谷发祥地

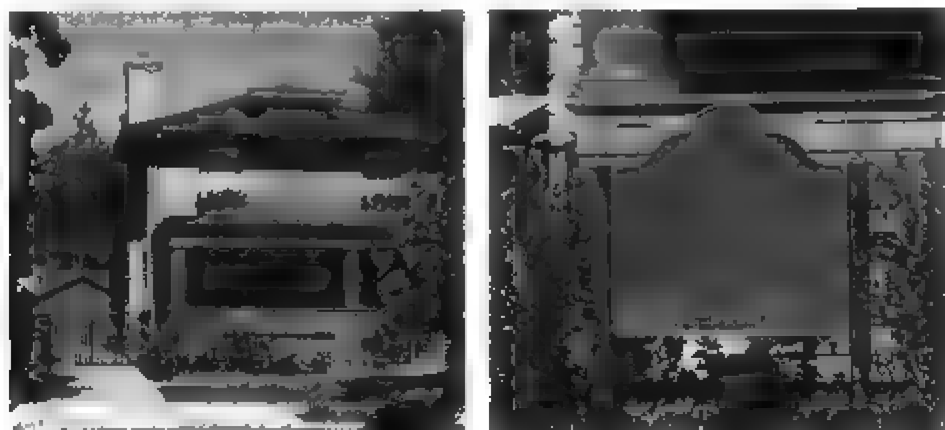
从西北方向依次来看，这些城镇的名称分别为帕洛阿尔托(Palo Alto)(斯坦福大学位于此地)、山景城（Mountain View）、森尼维尔（Sunnyvale）（英特尔的竞争CUP厂家AMD位于此地）、圣克拉拉（Santa Clara）（生产CPU的大企业英特尔总部位于此地）、圣何塞（San Jose）、米尔皮塔斯(Milpitas)、弗里蒙特（Fremont）等，它们都是沿着旧金山湾西岸发展起来的。最近，硅谷地带在圣何塞处折回正沿着旧金山湾东岸向北逐渐延伸。

“硅”并非只意味着元素硅（Si），它还意味着“硅”这个词所代表的高新产业。

在圣何塞和旧金山的中间有一处名叫帕洛阿尔托的城市，这里建有很多闲静的住宅。该市与斯坦福大学所在地相邻，“硅谷发祥地”的标志物就位于该市的一角。

1989年，在被指定为加利福尼亚州史迹的说明书中记载着如下事迹。“斯坦福大学的弗雷德里克·特曼(Frederick Terman)教授劝他的学生威廉·休利特(William Hewlett)和戴维·帕卡德(Dave Packard)不要在东海岸的企业就职，而要在当地创立与电子技术相关的公司。他们都听从了教授的建议，并于1938年在这个车库中成功开发出第一种产品——音频振荡器（电子电路实验用的低频率振荡器）。”这两个学生就是现在在电子计测仪器和PC等领域都非常有名的惠普公司的创立人（惠普公司于1939年创立）。

位于建筑物左侧最里面的是休利特和帕卡德开发新产品时使用的车库。与当时的照片不同的是，车库的木门被重新上漆装饰过了，当时就那样使用的（木板的节孔位置与《惠普之道》这本书的封面所拍摄的照片一致）。眼前的住宅是2005年被重建后的样子。



● 图1-2 休利特和帕卡德使用过的车库的照片

但是，硅谷这一叫法是在20世纪70年代初才开始使用的。

“硅”本来是一种元素的名称，这种元素的单晶体在现在的半导体产品原材料中应用极广。另一方面，“硅”这个词象征性地表现了现在的半导体产业，是支撑现代高新科技和IT产业的器件和材料的总称。

1947年，半导体行业迎来了属于自己的“黎明”。肖克利、巴丁、布拉坦发明了在半导体锗上立起一根细铁丝的点接触式晶体管（他们因为这一成就于1956年获得诺贝尔奖）。开发地点位于美国东海岸的贝尔电话研究所。

这么说是因为休利特和帕卡德在此车库开发产品的时候正是真空管的全盛期，当时还不存在半导体和硅这样的词语。因此，“硅谷发祥地”的代表性标志虽然是真空管时代使用过的建筑物，但是因为它在世界范围内成为了支撑半导体、IT产业的区域，作为原点它被后世继承了下来。

实际上，以半导体产业为中心的硅谷的原点始于1955年肖克利在帕洛阿尔托创立了肖克利研究所。当时，在前来应聘的研究人员中有戈登·摩尔、罗伯特·诺伊斯（Robert Noyce）。他们曾经都是仙童半导体公司(Fairchild Semiconductor)和英特尔公司的创办人。

正是因为有了包括戈登·摩尔、罗伯特·诺伊斯在内这些从肖克利研究所出来后独立创业的人，现在的硅谷才能成为半导体产业的中心并得以不断地扩展。

晶体管

晶体管被发明之时，其结构都是现在所说的双极结构。当时，提起晶体管，就只有双极晶体管，所以没有采用双极晶体管的叫法。自从FET(field effect transistor，场效应晶体管)被发明后，为了将双极晶体管与FET明确区分开，才在晶体管前面加了“双极”二字。

IT、PC、CPU

<IT> Information Technology（信息技术）。

<PC> Personal Computer。通常被称为“个人电脑”， 其硬件部分大都采用由各个厂家所销售的“IBM交换机”和苹果公司(Apple Computer, Inc.)的“Mac”。

<CPU> Central Processing Unit（中央处理单元）。相当于电脑的大脑。要想活用这个大脑，就需要一定的程序。现在的CPU都是以装有FET(场效应晶体管)的逻辑电路为基本单位来进行算术运算和逻辑运算。另外，被用于PC等东西上的CPU，不仅仅包含运算部分，还包括可以临时存储数据的存储器等，这些都被编入了一个IC中。

戈登·摩尔与摩尔定律

戈登·摩尔是IC产业的巨头企业——英特尔公司的名誉会长（2006年），他也是英特尔公司的创办人之一。据说1965年当他还是仙童半导体公司的开发负责人时，他就对IC集成度的未来进行了预测，作图表分析了以前技术革新的程度，结果得出IC的性能每隔2年（也有18个月之说）就会翻番。

在此，IC的性能不仅仅是指单位面积内晶体管的数量，而且还要依赖其运行速度，所以现在关于如何把握这个定律存在很多争议。但是，摩尔定律并不是按照科学理论得出的结论，所以我们最好将其理解为是通过总结1965年之前的技术革新而得出的结论。不过，根据资料的使用方法的不同，现在有主张说此定律依旧可以应用。

同时，在微型计算机时代大放异彩、风靡全球的英特尔公司的“i8080”于1974年问世，其CPU的大小约为4mm × 5mm，晶体管数量约为4500个（运行频率=2MHz）。并且该公司于2006年推出的“Core2Duo”的CPU的大小约为10mm × 14mm，晶体管数量约为291 000 000个（运行频率=2330MHz）。

按照摩尔定律计算的话，在这32年间，一个CPU中的晶体管数每2年增加2倍，32年就是2^{16}（65 536）倍。CPU单体就为291 000 000/4500=64 677，正好一致。

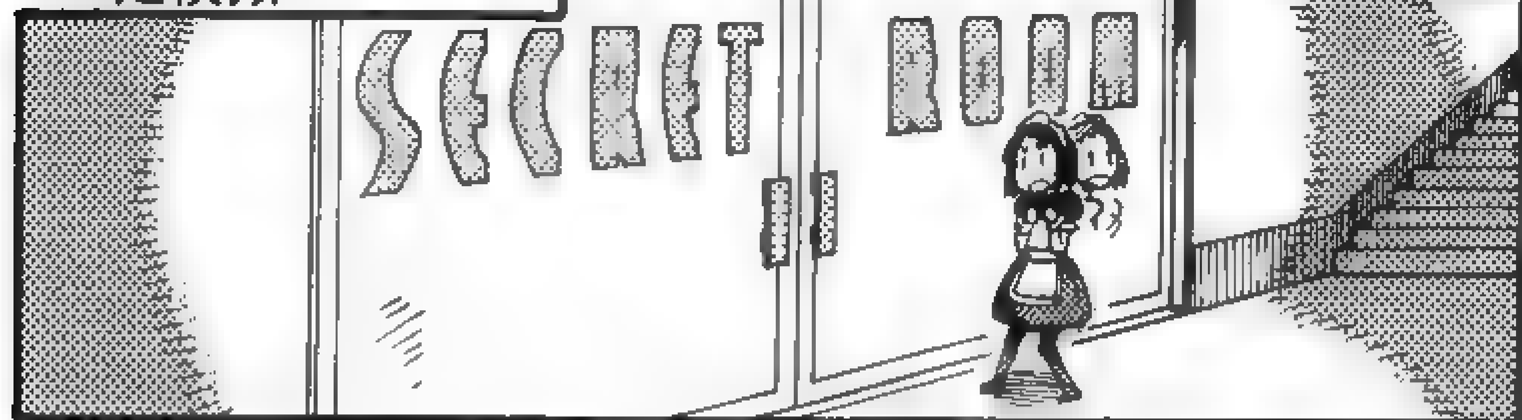
但是，如果乘以运行频率的话，就大约为7500万倍（实际上，因为运算电路的手法不同，所以运算能力推定为2亿倍）。

因为通过精妙的加工技术能够在硅上制造晶体管了，所以IC的性能戏剧性地被提高了。其性能是否还是按照摩尔曲线的规律在提高呢？很多观点开始对此产生疑问。1974年，IC的最小单位为5μm左右，2006年大概为0.05μm（50nm）。据说如果这样继续变小的话，到了十几年后，就必须加工几个像原子那样大小的东西。但是，这种观点只是在平面上的看法，如果比现在更立体的制造技术成熟后，每个IC的晶体管数极有可能还会继续上升。

第 2 章

模拟和数字的世界

1 人类的五感几乎都是模拟









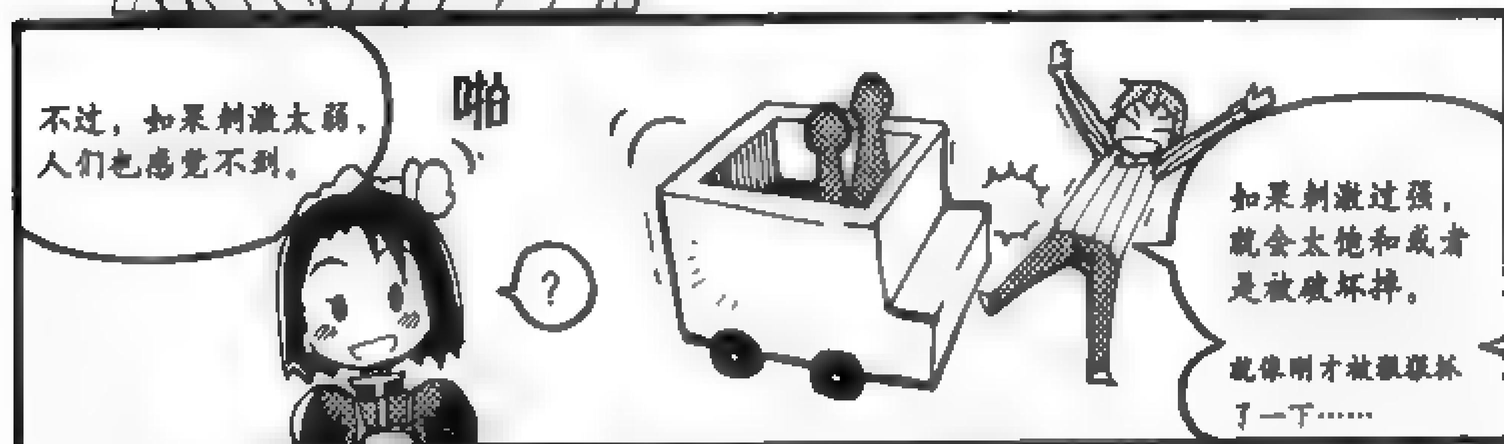




所谓的五感就是指视觉、听觉、嗅觉、味觉、触觉。

特别是视觉和听觉就相当于一种模拟传感器，它能够连续地捕捉到刺激。

啦啦啦





6位数？
也就是大约是
100万倍？
哇噢！
因此，为了把与人类五感有关的各种现象作为模拟量来处理，
就需要很大的空间和一定的重量。
电影胶片
音乐唱片
照片底片
正片
印刷品
程序库的容量也非常大。
那么，那个屋子也装有庞大的模拟量吧？
那个屋子？
秘密资料库！


啊！
……


没错，因为创业以来的所有信息资料都在那里保管着。


信息量真是大得惊人啊！

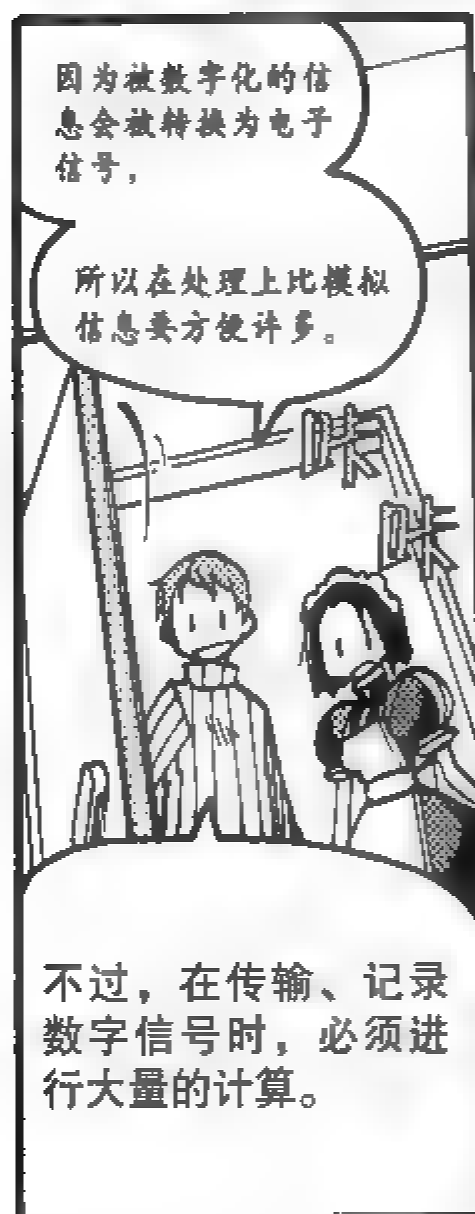

因此，要把模拟信息转换为电子信号。


如果那样的话，声音和图像的质量不是就不好了吗？
不用担心啦！


这样，连模拟信息的时间轴、大小、方向都可以跳过了。
噢。


即使信息量有所减少，但有一种技术却可以实现在五感识别信息时使其感知的信息与原有的信息没有什么差别。


那就是数字化技术！
太厉害了！


因为被数字化的信息会被转换为电子信号，
所以在处理上比模拟信息要方便许多。
不过，在传输、记录数字信号时，必须进行大量的计算。


因此，正是由于运算装置（IC）的发达，数字化技术才一下子得以加速普及。


IC真是太了不起了！
哦，今天还是咖喱饭啊！

2 数字是指1和0吗？

今天是海鲜味的哟！
咔
昨天是牛肉的，那之前也是牛肉的，那之前的之前是海鲜的。
啪啪
啪啪
这是数字信息吗？
什么意思？
嗯……
是想让我说你傻吗？
用离散的物理状态（电压、音量、光的明亮度等，或者是那些状态的组合）来表示物理量或数值。
这个就叫做数字信息！

● 二值逻辑

只要这个离散值的数量（种类）是有限个，就一定是数字信息。

现在利用最广泛的就是利用了“两个状态”的……

“二值逻辑”。

并且，将此作为数字利用的是

“二进制数”。

你听说过吗？

嗯……
喱饭到哪儿去了呢？

所以我说只有牛肉味和海鲜味这“两种状态”，然后再问这是数字信息吗？

原来如此……这很有趣吗？

啊啊

不……

不，咖喱暂且不提了……

咚

“两种状态”其实也有包含很多种情况。

比如，像这些！

◎ “高电压”和“低电压”
◎ “大电流”和“小电流”
◎ 电压（或电流）的“+”和“–”（在串联通信中使用）
◎ 交流信号振幅的“大”和“小”
◎ 频率的“高”和“低”
◎ 比交流信号基准相位“前进”和“迟延”
◎ 光度的“强”和“弱”
◎ 空气和水流（或压力）的“有”和“无”







● bit（位）

同时，我们将这两种状态作为一组（二值逻辑的最小单位）

使用时的最小单位叫做“bit（位）”。

1 0

ON OFF

「bit」

从数学角度来考虑，要表示某种状态的“有”和“无”时，

利用“1”和“0”来表示是不是很方便?

嗯！
很容易理解。

有啊！

猪肉咖喱！

不过，除了咖喱以外，还有其他选择吗?

“有”？
“无”？

你是不是只会做咖喱饭啊?

3 取样与量子化

但是，无论多么好吃……

每天都吃咖喱饭总是不太好吧！

少爷！

什么事？

关于那两种状态，请你再教教我！

好，好的！

你还真用功！

就是用二值逻辑的基本概念来表示两种相反的状态。

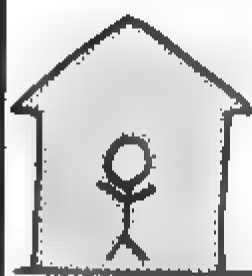
● 布尔代数

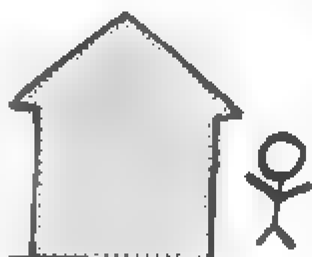
把刚才所说的“两种状态”组合一下，也能够将它们应用到算术运算和布尔代数中去。

布尔代数？

比如，围墙的“内侧”和“外侧”、

“在家”和“不在家”这样的概念容易理解吧？

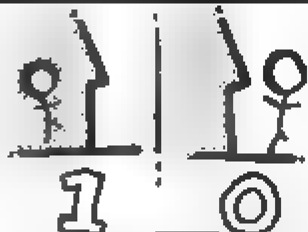




1

0

嗯，那么说成“在家的内侧”和“在家的外侧”不行吗？



当然可以！这也是两种相反的状态。

布尔代数的前提是以“是”和“否”这两种状态来表现事物，

并以这两种状态作为描述事物的基本构成要素创造出了逻辑体系。

● 逻辑电路

由这些组合制作而成的系统……

嗯！

就是“逻辑电路”。

不过，逻辑电路未必只能根据电子电路来制作。

但是要想实现整个系统的小型化、高密度化，一般都要应用电子电路。

● 正逻辑和负逻辑

在逻辑IC中经常用到的“组”就是“Hight（或H）”和“Low（或L）”这两个电平。

High H
Low L

“H”就是“1”，对吧？

也就是“H” “1”，“L”=“0”。

不对！

把“1”与“H”对应，还是把“1”与“L”对应。

是系统设计者自己来定的。

啊！？

那不就乱了吗？

嗯，是很乱！

利用了这种电子状态的“H”、“L”，并且可以应用到信息处理中去的东西，

就是“逻辑运算电子电路”的大规模集成元件（各种各样的LSI）。

根据电子电路的逻辑设计原理，

把“H”分配给逻辑状态“1”为“正逻辑”。

当“1”=“H”时，为正逻辑。

当“1”=“L”时，为负逻辑。

把“L”分配给逻辑状态“1”为“负逻辑”。

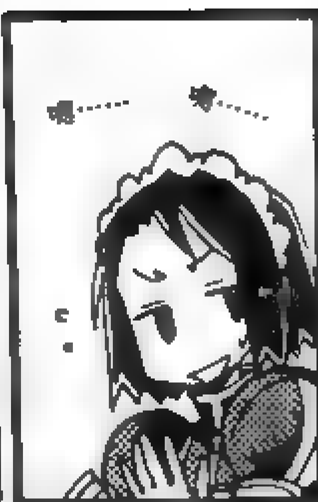


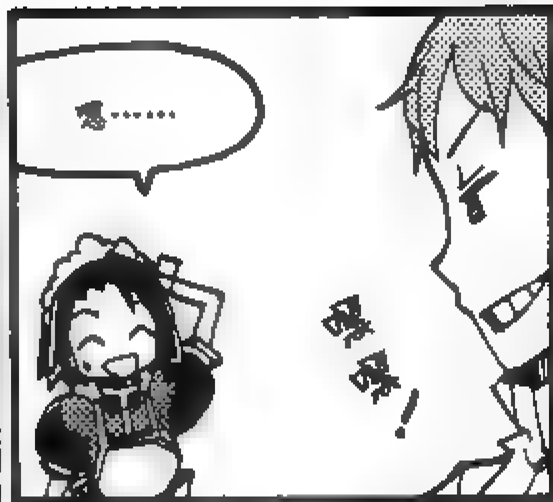


● 二值逻辑

刚才我已经讲过二值逻辑了吧！
就是表示两种相反的状态。
哦，你都记住了。
那么，另外还有一个“二进制数”。
它是处理数值方面的一个体系。
我们日常生活中所使用的基本上都是十进制数。
十进制数？
怎么讲好呢？
1的后面是几？
2！
2的后面呢？
3！
3的后面呢？
4！
……8、9的后面呢？
10！
对！
要准备“一个高位”进行“进位”！
这不是理所当然的吗？
少爷，你到底怎么了？
啊——


那么，如果
是二进制数
呢?

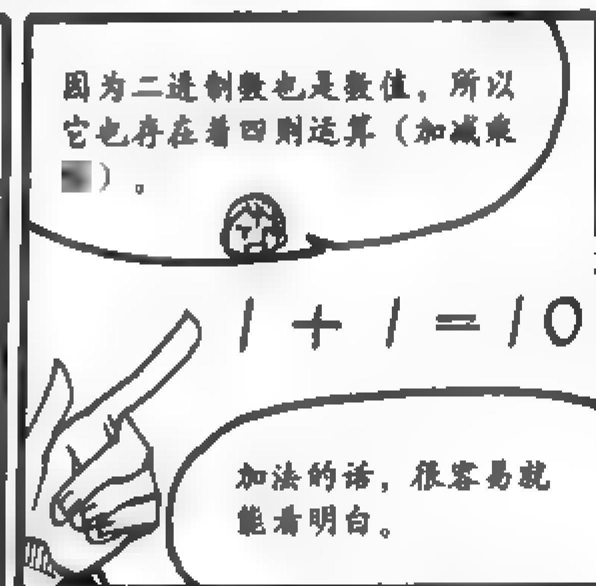





当采用二进制数时，
1的后面不是2。
马上就会进位
为10。


啊?
不是2?


继续往下数就是“11”、“100”。
二进制数
1
+) 1
10
10
+) 1
11
11
+) 1
100


因为二进制数也是数值，所以
它也存在着四则运算（加减乘
）。
1 + 1 = 10
加法的话，很容易就
能看明白。


你看!

这样看，是不是就一目了然了？



	二进制数	十进制数
2^0	1	1
2^1	10	2
2x1+1	11	3
	100	4
	101	5
	110	6
	111	7
	1000	8
	1001	9
	1010	10







4 数字信号

对了，那些传输数字信息的电子（电磁波）性质的信号

几乎都是模拟信号。

咦？

这个如何解释？

比如，家庭中的FAX电话，

就是利用了声音波段频率的模拟信号。

其内容就是数字信息。

咦？

模拟信号也能传输数字信息？

……

在电子电路的入门书中有这样的插图。





但是，实际上，方形波的波形本身也是一种模拟波形，

正弦波根据其使用方法也可以传输数字信号。

啪

不能一概而论啊!

用来传输PC等东西中所使用的数字信号的逻辑电平，

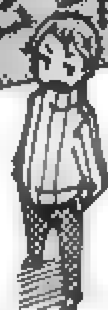
就是一种连续变化的电压信号。

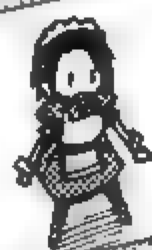
■ 高电平和低电平

在逻辑电平中，把比某种电压（高电平阈值电压）更高的电压看作“高电平（H状态）”。

电压

H（高电平）





L（低电平）

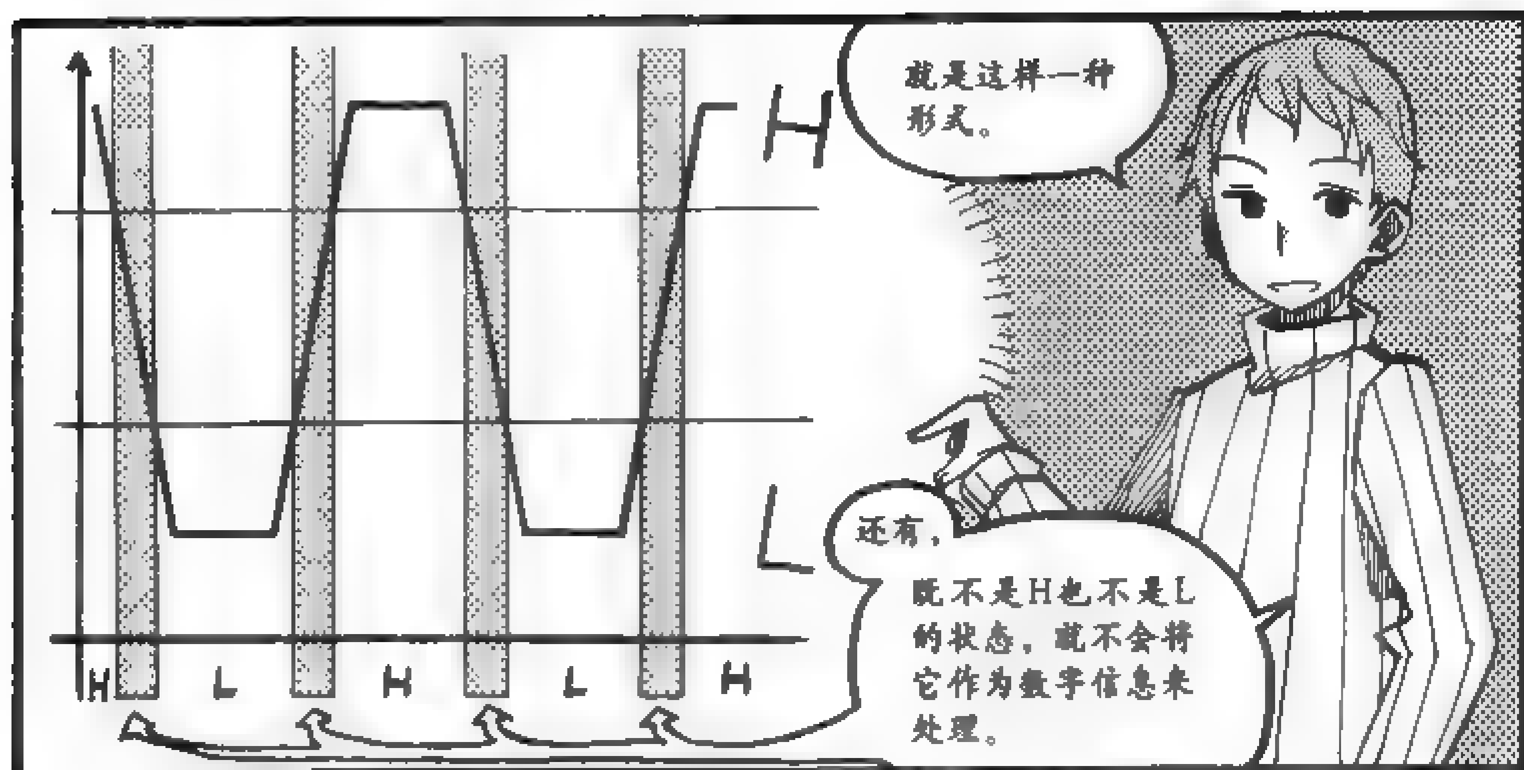
把比某种电压（低电平阈值电压）更低的电压看作“低电平（L状态）”。

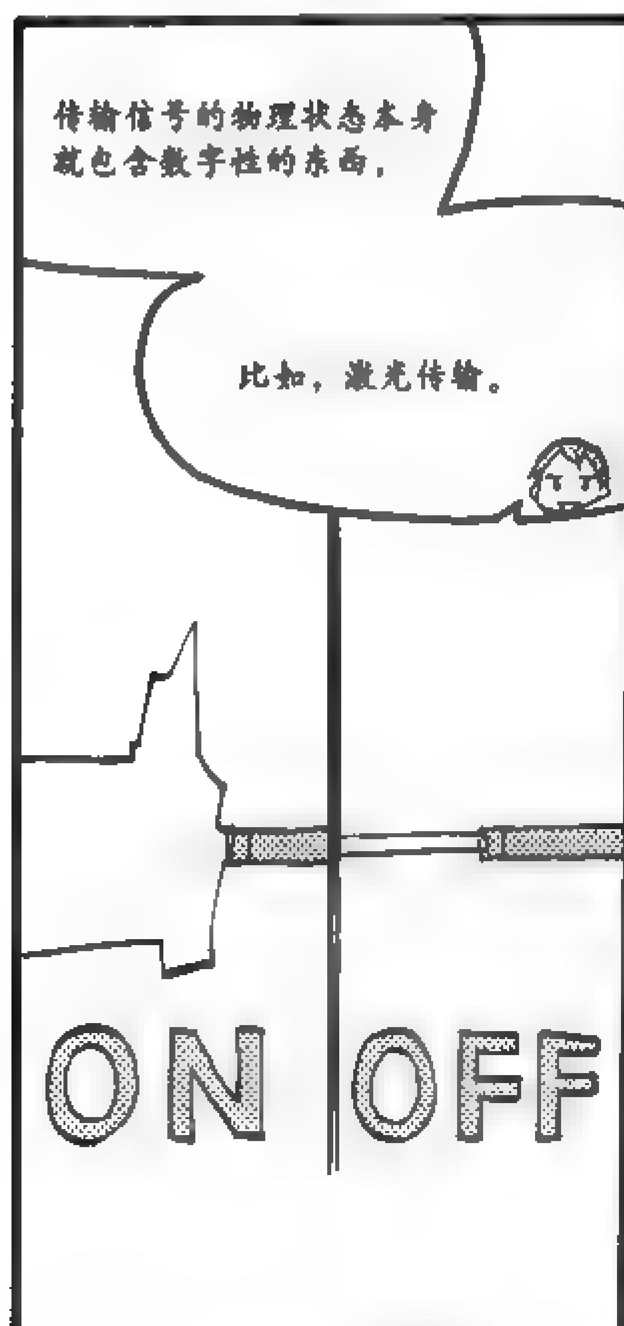
也就是说，把某个范围内的模拟量作为一个状态，

把另外一个范围内的模拟量作为另一个状态，就能将它们与数字信息相对应。

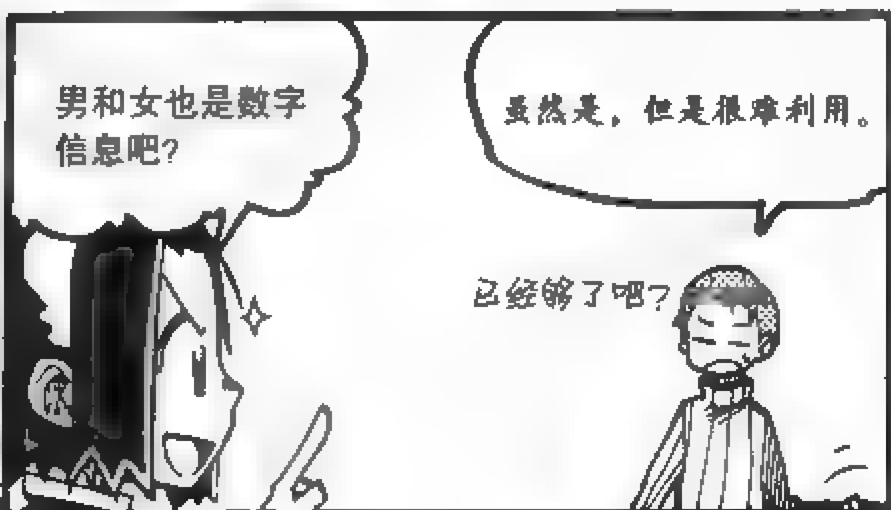
刷——…

简单地说，


H
L
H
L
H
H
L
就是这样一种形式。
还有，
既不是H也不是L的状态，就不会将它作为数字信息来处理。


传输信号的物理状态本身就包含数字性的东西，
比如，激光传输。
ON
OFF


真有意思！
“光”和“影”，“晴”和“雨”，“生”和“死”等。


男和女也是数字信息吧?
虽然是，但是很难利用。
已经够了吧?

如果用更观念性的印象来解释的话，"数字信号"、"模拟信号"的表现……

取决于所传送的信息量的基本属性是作为哪个数字被处理的、是如何处理的。

比如"数字收录机"。

输出信号为"模拟信号"，但是"信号的传输"、"信号的处理"、"信号的记录方式"等都是作为"数字信息"来处理的。

也就是说，使用1和0来处理信息非常轻松。

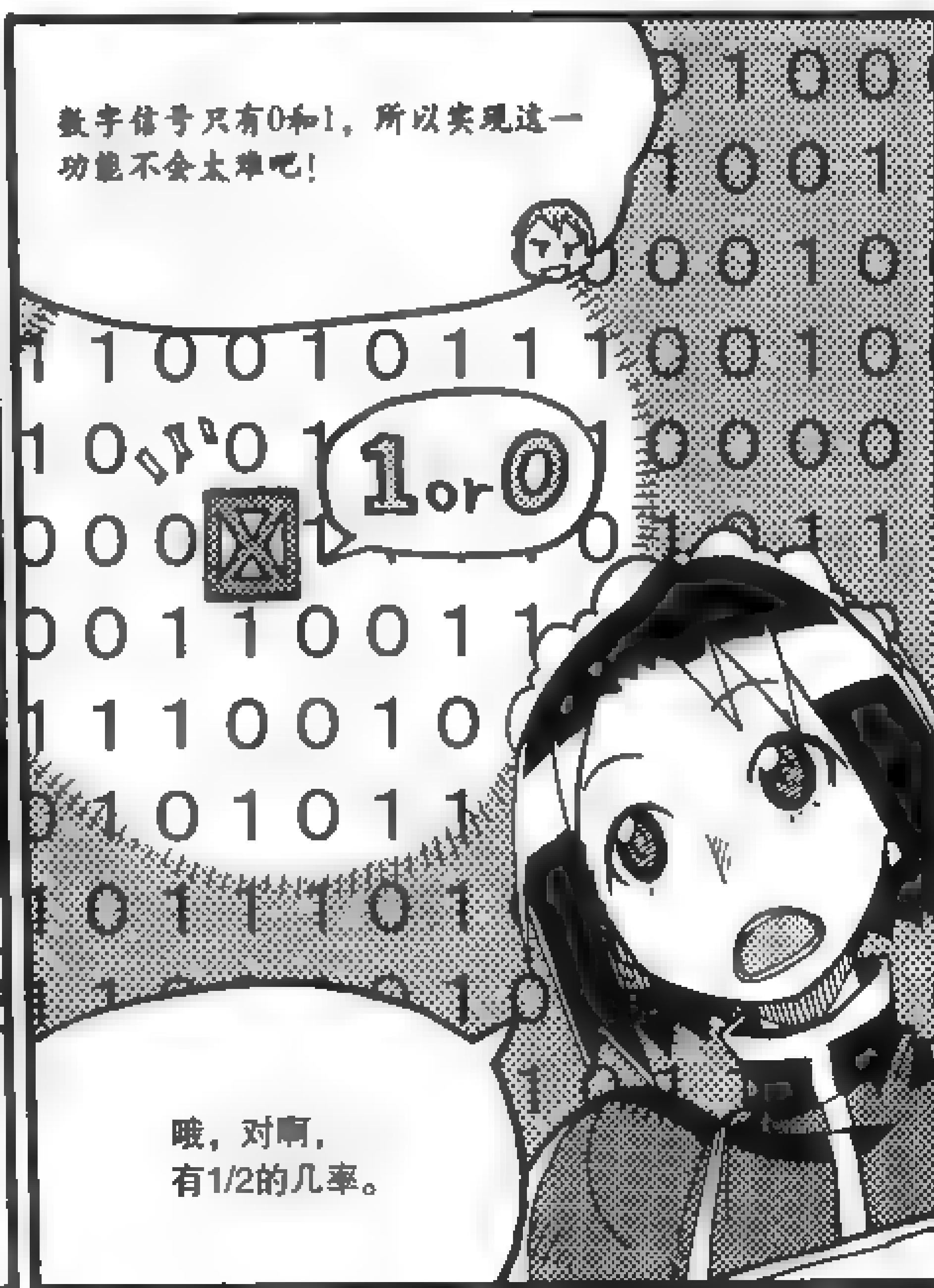
但是，我经常听说"因为是数码（数字）的，所以音质好"、"因为是数码（数字）的，所以图像清晰"，

这又如何理解？


啊，这是说唱片之类的东西有杂音，很难听。
啪


但是CD被开发出来后，声音都是作为数字符号被记录的，即使有点瑕疵，也有校正的功能，
所以几乎听不出来杂音。


还有校正瑕疵的功能吗？这也太厉害了！
你想想看，


数字信号只有0和1，所以实现这一功能不会太难吧！
1or0
哦，对啊，有1/2的几率。

也就是说，它能够得到与原有的模拟信号同样的波形，还不受杂音的影响。

这就是“音质好”的重要原因。

CD开发时，取样速率为44.1kHz。

这是由人的听觉上限大约为20 kHz所决定的。

但是，因为听觉的特点未必就是线形特点，

所以就将CD等产品的取样速率提高到4倍，以此来提高CD的音质。超级CD等产品就被推出了。

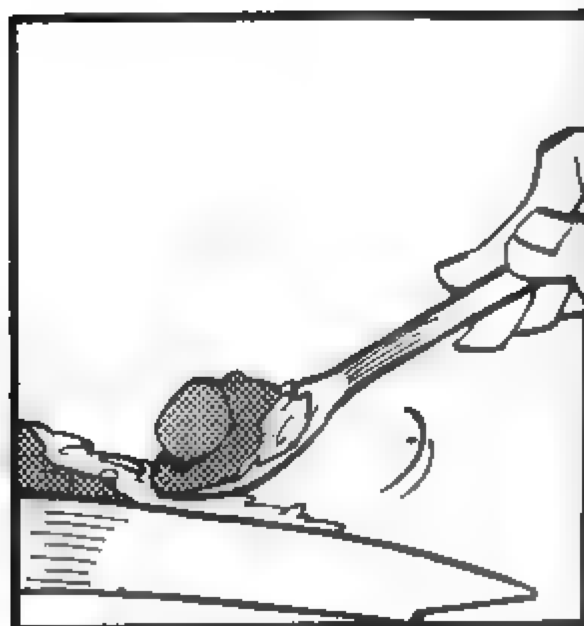
这是不断追求声音质量的结果。

非常感谢！

……

再来一碗，还有吗？

你不是一直在抱怨老是吃咖喱饭的吗？




嗯!
真好吃!


我就喜欢这个味道!
芽衣!

……





5 后 续

手 机

在手机问世的初级阶段，它都是把通话声音作为模拟信号来接收和发送信息的。

但是，随着处理声音信号的专用DSP（digital singnal processor）的开发和进步，声音信号都能被数字化处理了，这样杂音就变少了，并且即使是在微弱电波状态下，也能够进行减少杂音的运算处理，照样可以进行语音通话和数据通信。

不过，在电波过弱的情况下，数字信号不能恢复到原来的信号，有可能会发生通话中断的情况。

像这样，在声音信号也能够通过数字通信被处理的背景下，手机就产生了要接入互联网等原始的数据通信需求，于是就把其所有的信息内容都转换为数字，只是凭借数字化就实现了通信方式和设备的统一。

在进行数字通信时，不仅要单纯地发送和接收电波，而且还要总结分析一些（16个或64个）二值逻辑信息，将它们转换为“一个模块”接收和发送出去，这样就能够一次发送出大量的信息。像这样的技术已经接受了市场检验。有时大家会听到“通信速度快”这一说法，实际上电波的传输速度几乎等同于光速，不过有时要表现它一次能够传输大量的数据信息。到底用多长时间能够将某些大容量的信息发送出去呢？也就是说，如果能在短时间将某些大容量的信息包传输出去，就可以称之为“快”。

把二值逻辑信号并列地排在一起，从弱电波中提取信号，与电话通话几乎同步的运算速度等，可以说这些技术正是因为半导体器件技术的进步才能够实现耗电低、设备小型化的目标。

布尔代数

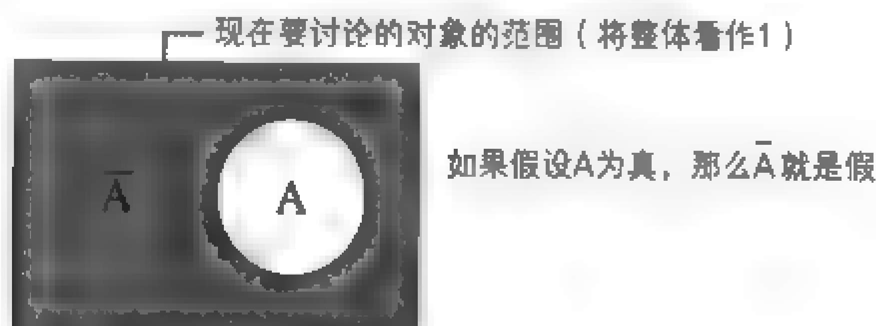
布尔代数是处理两种状态的逻辑数学中的基本概念。一般情况下，我们将这两种状态的一方叫做“真（ture）”，另一方叫做“假（false）”。有时

候也会将其英语单词的部分字母省略，分别记作T和F。

但是，被编入数字电路中的逻辑电路当然也会作为电子电路的一部分运行，为了使其与电子电路更容易联系起来，在这里我们将做一下置换，即“真=H”、“假=L”，然后再进行说明（本来想用1和0来置换的，但是因为已经把讨论的整个领域都定义了逻辑值“1”，所以为了避免混淆，就将这一部分的“真”和“假”分别置换为“H”和“L”）。

并且，因为布尔代数是逻辑数学，所以在定义一般符号的意义后，就能够展开逻辑式来证明各种定理。但是，在这里对于初学者来说，还是要向他们做一些图示说明。在图示说明中经常用到的就是“维恩图”（也叫文氏图）。

比如，我们先用长方形将我们要讨论的对象的范围圈起来。在这个长方形范围内，我们将用圆圈起来的内容A定义为真，那么假就是$\bar{A}$。

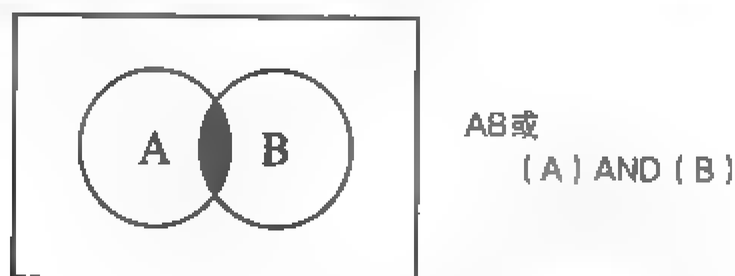


● 图2-1　$\bar{A}$=NOT（A）

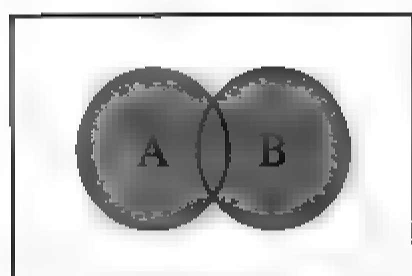
关于这个单项“A”，我们可以把A与$\bar{A}$看作是互逆的关系，也就是说它们为“相互否定”关系。要想通过A求出$\bar{A}$，通过否定的运算就能够得到其结果，可以表示为$\bar{A}$=¬A。（符号“¬”是否定运算符号）。

¬A的结果可以表示为“$\bar{A}$”。符号“–”是表示运算结果的，表示运算的符号是“¬”。

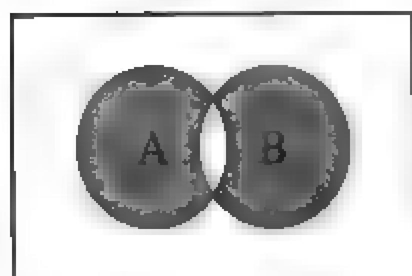
一些基本运算都是在两个要素之间进行的，除了上述的NOT运算外，还有AND、OR、EXOR运算。如果把这些概念用维恩图表示出来的话就如下图所示。在这里，两个元素都使用A和B。



● 图2-2　AND（逻辑积）

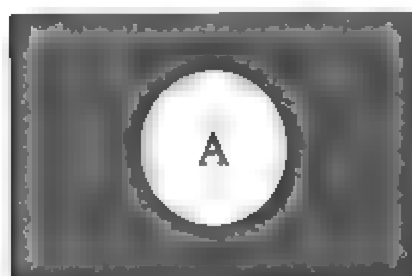


● 图2-3　OR（逻辑或）

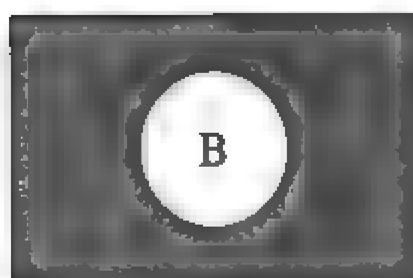


● 图2-4　EXOR（异或逻辑）

请试着思考一下图2-5和图2-6中NOT(A)和NOT(B)的逻辑或。

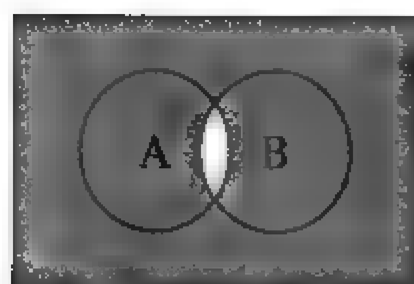


● 图2-5　NOT(A)



● 图2-6　NOT(B)

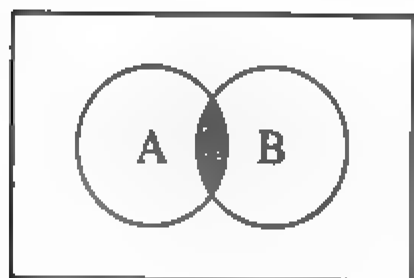
结果如图2-7所示。如果想得到对$\overline{A}+\overline{B}$的否定，结果为图2-8，正好等于（A）AND（B）。



(NOT(A))OR(NOT(B))

$\overline{A}+\overline{B}$

● 图2–7 $\overline{A}+\overline{B}$



NOT(NOT(A))OR(NOT(B))

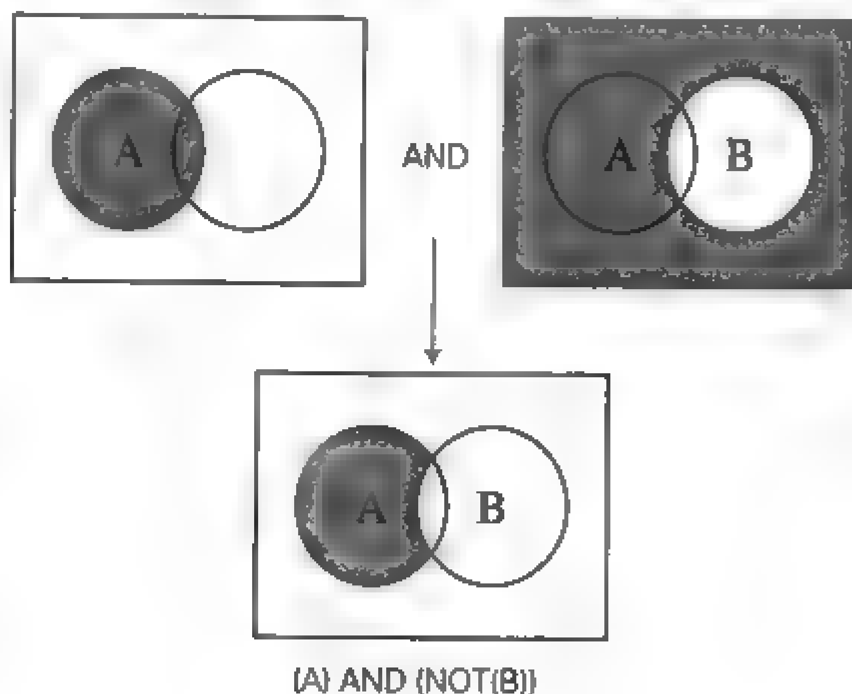
$\overline{(\overline{A}+\overline{B})}$

这个等同于AB

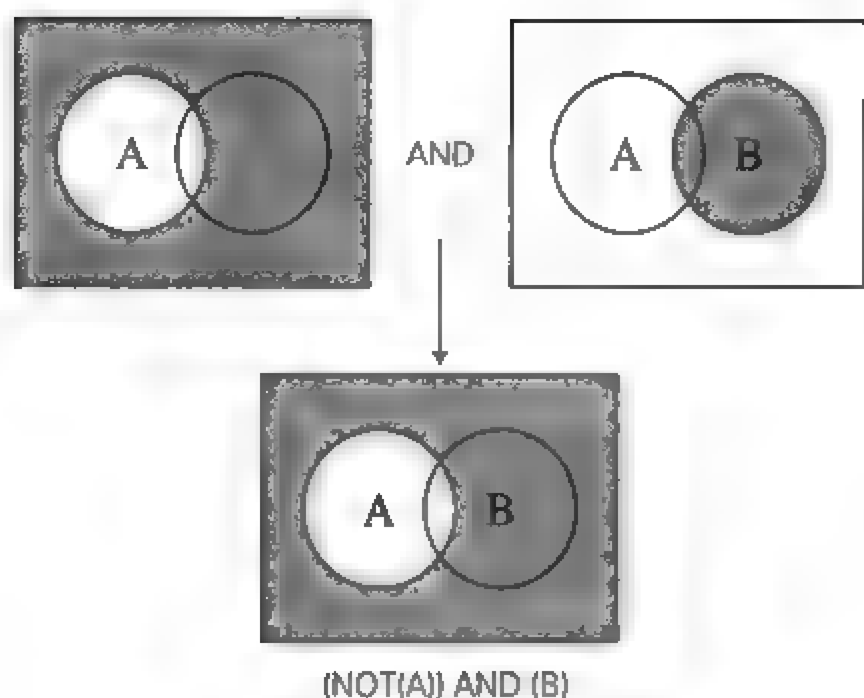
也就是AB=$\overline{(\overline{A}+\overline{B})}$

● 图2–8 AB

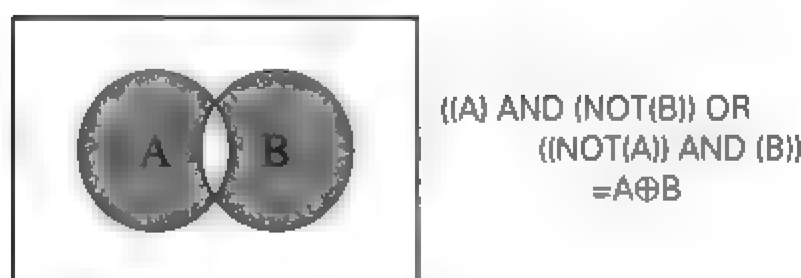
并且，如图2-9所示的（A）AND(NOT(B))、图2-10所示的（NOT(A)）AND(B)，将它们进行OR(逻辑或)运算，就会得到图2-11的结果。这与我们在图2-4所示的EXOR(异或逻辑)的运算结果一致。



● 图2–9 $A\overline{B}$



● 图2-10 $\bar{A}B$



● 图2-11 A⊕B

这样看来，只有NOT运算是必需的，而AND运算可以通过NOT运算和OR运算组合而成。即AND、OR、EXOR并不是完全互相独立的。也就是说，在逻辑数学中，可以通过NOT运算和AND运算或者是NOT运算和OR运算来组合其他的运算。但是，要想将运算次数降至最低，需要很好地将这些运算组合起来，这样才会更方便。

在电子逻辑电路中，也广泛地利用了逻辑数学的这几种运算方式，将4种运算电路组合起来。

我们用H和L将电子逻辑电路的运算一览表制作出来，如图2-12所示。

¬A

A	NOT(A)
H	L
L	H

A+B

A \ B	H	L
H	H	H
L	H	L

A·B

A \ B	H	L
H	H	L
L	L	L

A⊕B

A \ B	H	L
H	L	H
L	H	L

● 图2-12 各种运算的结果

不过，怎么将逻辑运算和“数值运算”结合起来呢?

我们已经明白，如果利用H和L这两种状态，就能够以二进制数来处理数值。

首先，我们来看看最基本的数值运算A+B(这里的“+”表示加法的意思，并非逻辑和。在逻辑运算和数值运算时使用相同的符号，容易给初学者造成混乱)。

若A=1或0，B=1或0，A+B的组合有4种：

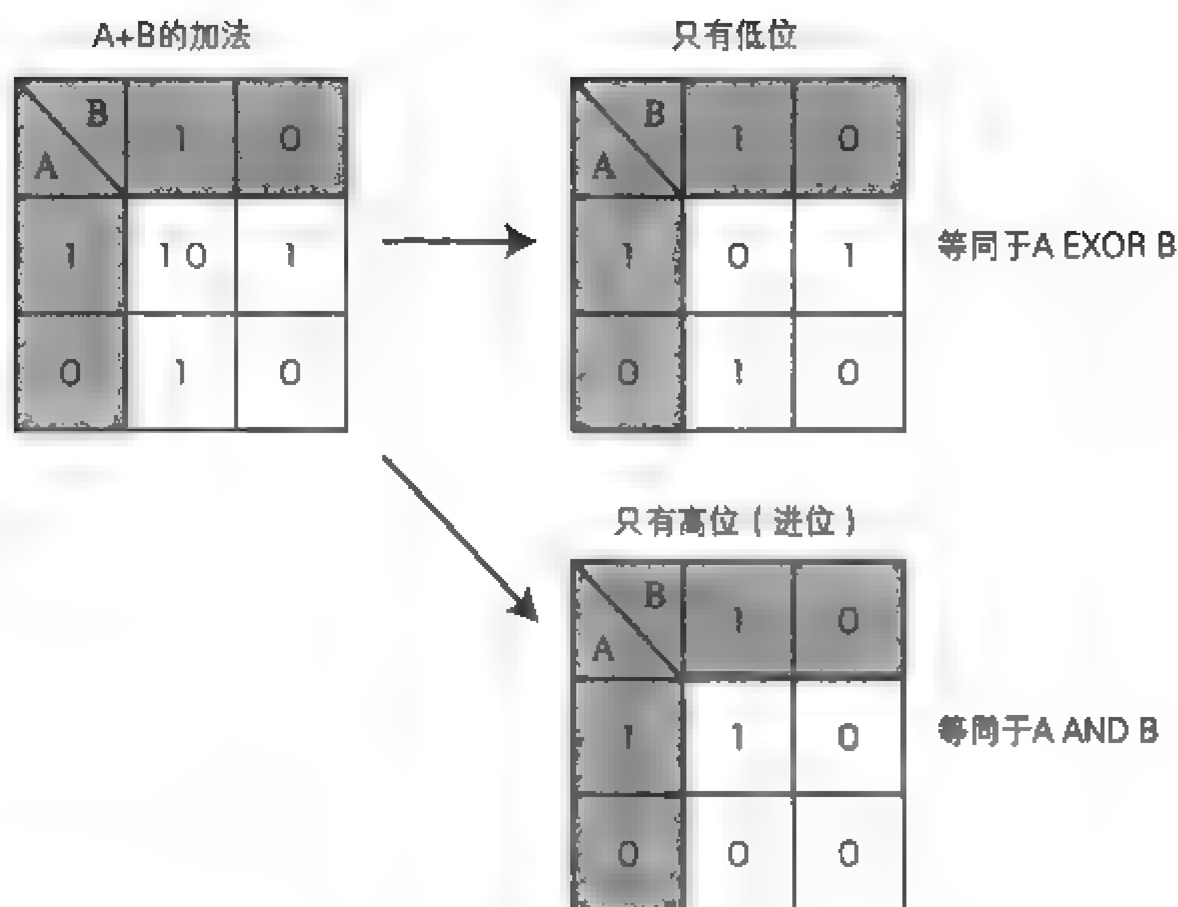
0+0=0、0+1=1、1+0=1、1+1=10（进位后，高位为1，加法运算的数位为0）。

这样，如图2-13所示，将各个数位分解来看，就能得到两个运算表。

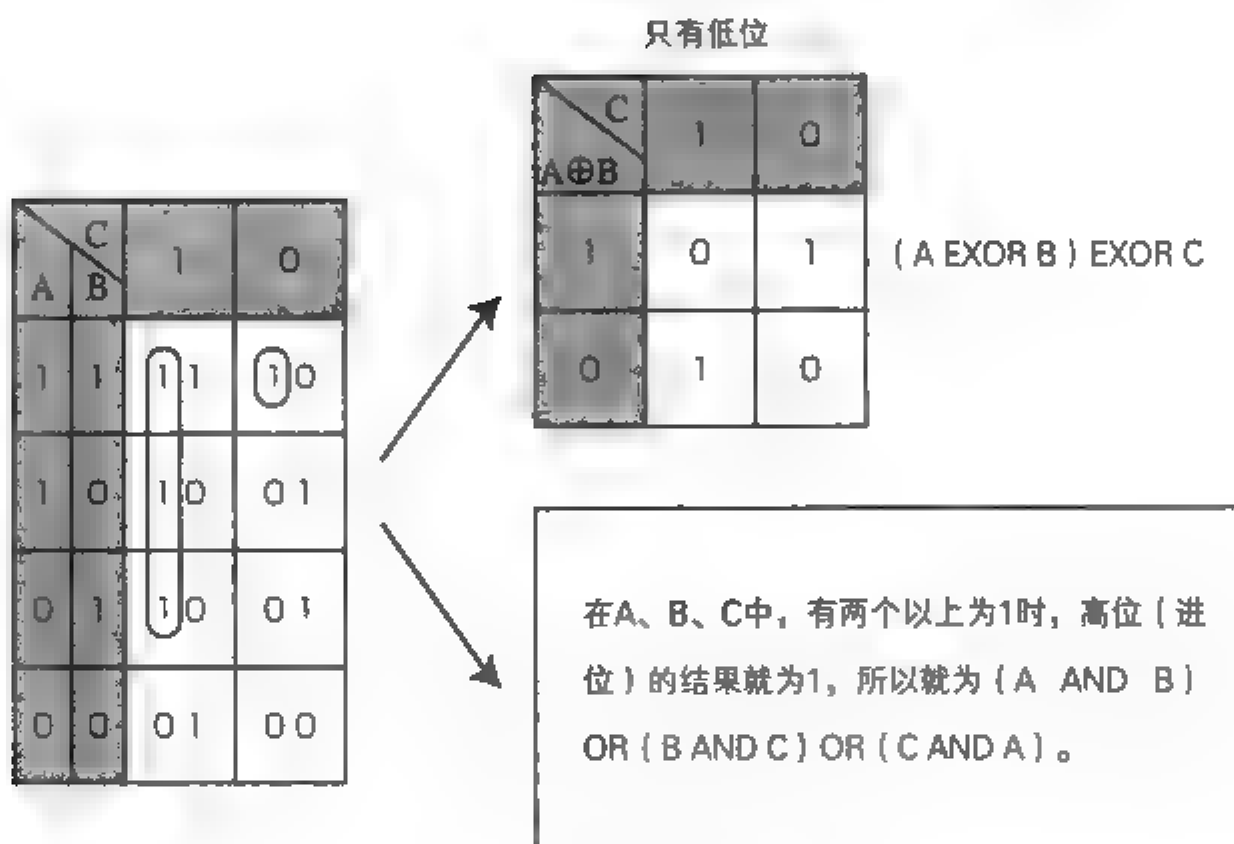
看一下表我们就能明白现在计算数位（低位）与A和B的排他性逻辑和的形式一样，进位后的部分与A和B的逻辑积的形式一样。

让我们再加一个数。如果将第一位看作加法位，有可能会发生从低位到高位的进位。我们用C来表示进位，考虑一下A+B+C时的情况。

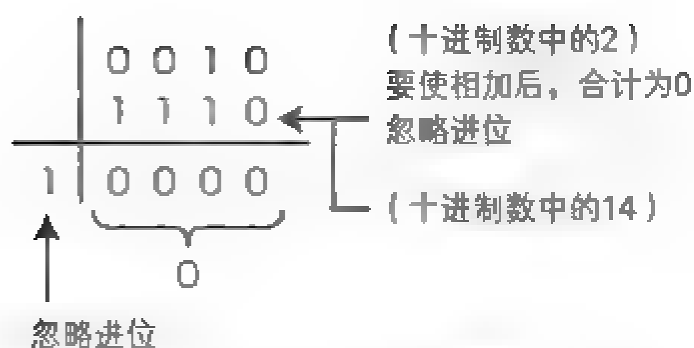
结果如图2-14所示，即使考虑低位的进位，也能够采用与刚才的一位数相同的加法。



● 图2-13　加法表



● 图2-14　从低位有进位的1bit的加法



● 图2-15　4bit的加法

这样，我们就清楚了如果将数值转变为二进制数后，就可以把每一位数字都按照二进制数中的二值逻辑来处理，这样就能够运用逻辑运算来实现数值的加法运算。

若能够进行加法运算，那么如何进行减法运算呢？一般认为减去某个数值，其实就是“加上负数”。那么，负数在二进制中应该如何来表示呢？

在十进制数中，负数是如何定义的呢？它认为与一个数的正数绝对值相加后结果为0的数就是负数。也就是说，5+（-5）=0，5的负数为-5。在二进制数中也可以同样考虑采用类似的处理方法。比如，在十进制数中，9加1结果为10，如果不管进位（不管有没有进位，都只看1位数），只看1位数的话就是0。也就是说如果把10作为基准来考虑1和9的关系的话，1和9互为“补数”。同理，2和8、3和7、4和6都是以10为基准的“补数”关系。利用这一方法，我们将1的负数中的负号用别的来代替，为方便起见将1的负数（相当于-1）记为9。同样，其他互为补数关系的数也可以采用此方法。

那么，0、1、2、3、4对应的负数分别为0、9、8、7、6。这样，5既可以解释为+5，也可以解释为-5。但是我们要事先将0编入正数，即0、1、2、3、4为正数，9、8、7、6、5为负数，这样各分5个就平均了。于是我们将1的负数表示为9。

这样看起来就像五进制数一样。因为只考虑了1位数（未满10），所以才会这样。如果位数增加的话（比如以100万为基准的话），中间的50万就会成为一个拐点。

那么，在二进制数中应该如何处理呢？如果是1位数，就只有1和0，不能作出补数。比如在二进制数中考虑一下4位（4bit）数应该怎么处理。

佩如，十进制数中的“6”用4bit来表示的话就是0110。要想得到“−6”，就要作出这个数的补数。也就是说，把这个数与补数相加，4bit全是“0”。结果会进位到第5bit,如果有第5bit，那么第5bit的数是“1”。回忆一下二进制数的加法规则为0+0=0，1+0=1，0+1=1，1 1 10。

```
      0 1 1 0
  +)  a c b a  ←— 在这里加补数
    1 0 0 0 0  ←— 想要得到这样的结果
```

在a处，因为0+a=0，所以a=0。

在b处，因为1+b=0，所以如果b=1，那么这个关系就会成立，但是会发生进位。

因为在c处有进位，所以

```
1 + c + 1 = 0
        ↑
        └ 进位
```

这样，如果c=0，就是1+0+1=10，会发生进位，自然在d处就会有进位，所以

```
1 + d + 1 = 0
        ↑
        └ 进位
```

这样，如果d=1，就是1+0+1=10，会再次发生进位，正好与这个数位的前后吻合。

归纳一下就是

```
      0 1 1 0
  +)  1 0 1 0  ←— 十进制数6
    1 0 0 0 0  ←— 十进制数6的补助
```

由此我们可以得知0110的补数是1010。也就是说，用4bit（4位二进制数）来表示十进制数中的“−6”的话，就是“1010”

如果将它视为正数的话，它就相当于十进制数中的“10”。

用二进制数4bit所表示的十进制数中的正数是从“0”到“15”这16个数，上述十进制数中的“6”在二进制数中的补数如果作为正数来读的话，就相当于十进制数中的“10”，这与“6+10=16”有很大关系。

在用CPU等计算数值时，通过二进制数所表示的数值只会以正数表示出来。在决定是要以正数还是以负数表示时，取决于处理数值的人的立场。

也就是说，在4bit的计算中，是把0000、0001、0010、……、1101、1110、1111这16个数作为十进制数中的“0～15”来处理，还是把它们当作十进制数中的“0～7”和“-1～-8”来处理，这完全取决于使用者的需求。

让我们再次列式来表示一下二进制数的补数的求法。

这种方法在二进制数2位以上的数中都通用。

1）首先从低位看，只要有0，补数的那一位也是0。

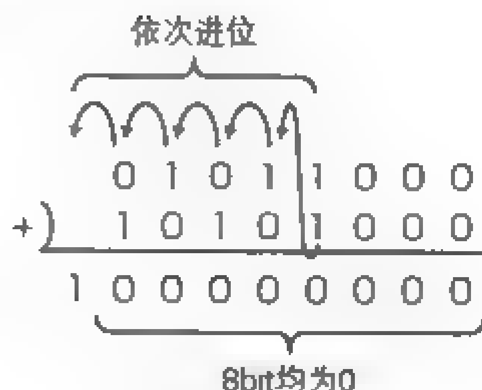
2）从低位看，最先出现1的那一位，补数的相同位也是1。

3）对于比2）中所述位数高的所有位，如果是1，其补数的相同位就是0；如果是0，其补数的相同位就是1。

比如8bit的二进制数，其补数的求法如下：



相加确认一下其结果

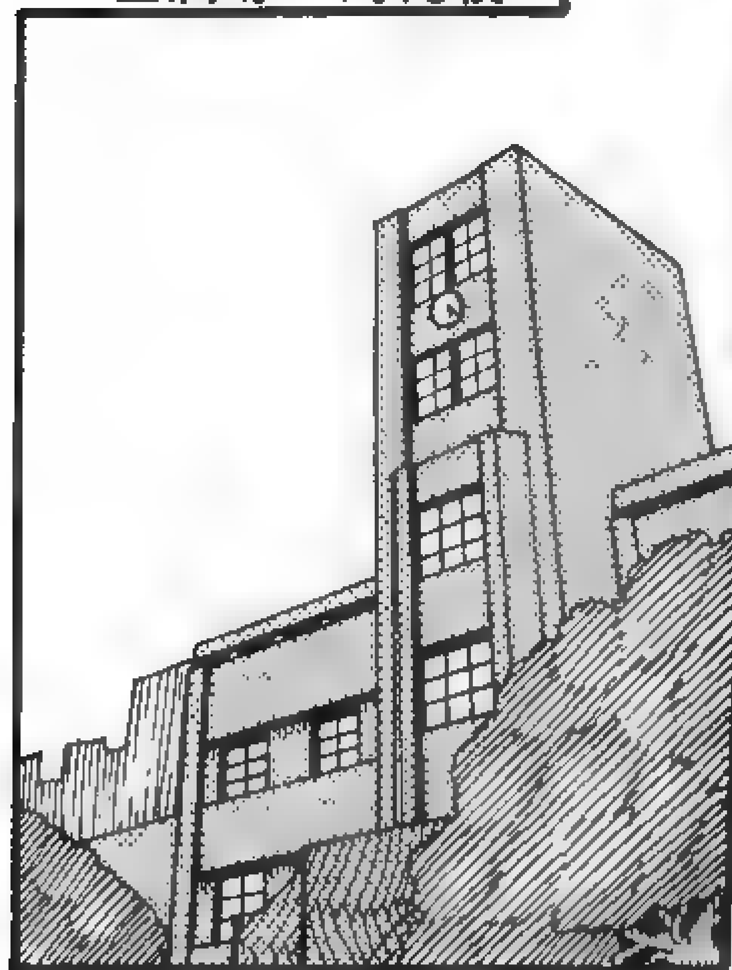


如上所述，我们可知：在二进制数中也能够表示负数，而且从补数入手的这种思考方法非常重要。

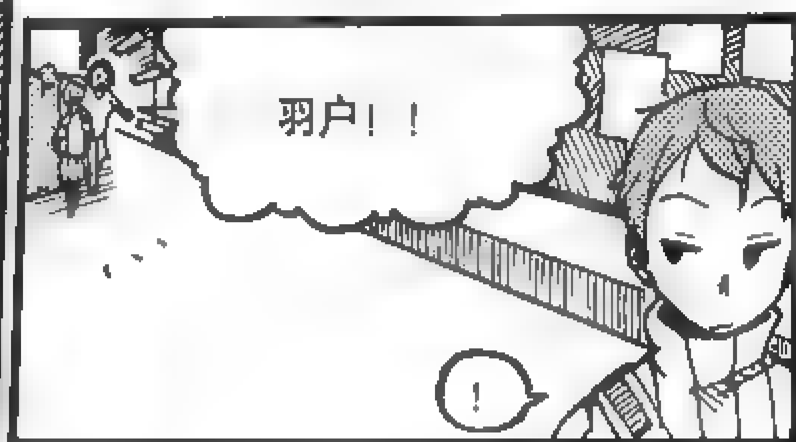
第 3 章

半导体器件及其材料

1 导体（金属、半金属等）的比较



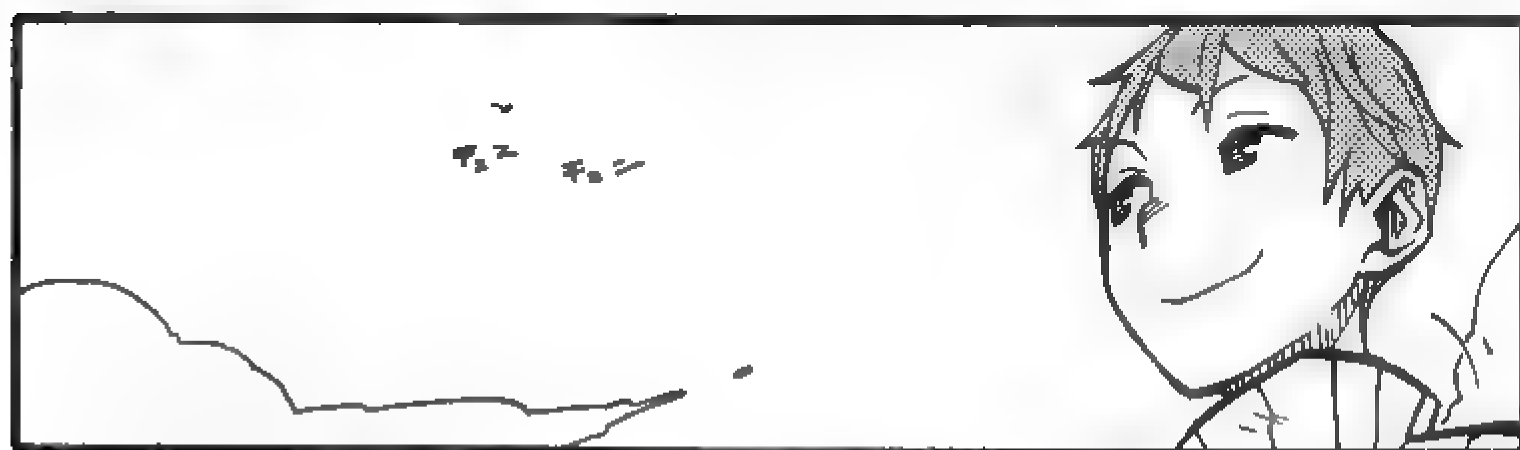









哒
哒
那还是羽户吗？

羽户好像变了……
以前他总是说“一回家就容易想起往事，所以不想回家”，可是……
现在他竟然飞奔回家，到底发生什么事了？


回家是很快乐的，
这种感觉是从什么时候开始的呢？
家里有人相陪是件幸福的事情。

要是这种日子一直持续下去就好了。
我回来了！

咦？
芽衣到哪里去了？

!







大扫除!

我一直都很担心少爷的健康状况，你老是在这间满是灰尘的屋子里学习……

打扫!


什么呀！
这里有空调，这么舒适，我的身体没问题！
谢谢你！


难得你正好在这儿，今天我们就在这里上课吧！

●导 体


之前我已经说过，“半导体”未必就是介于导体和绝缘体的之间的物体。
今天我们要讲的导体，也就是指能够让电流通过（导电）的物体。
导体

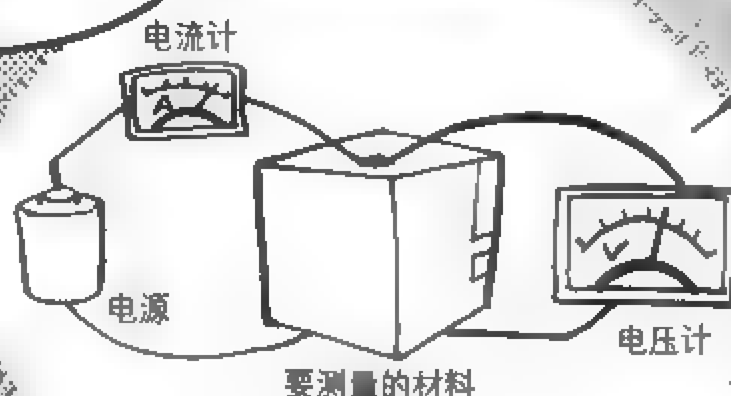

那么，我们如何才能检验它是否能够导电呢？
嗯，
把它与电池和灯泡连接在一起，看看灯泡是否亮不就可以了吗？


没错！
不仅铜线能导电啊！
铁钉、硬币、盐水都可以！

● 欧姆定律的运用

$$E[\mathrm{V}] = R[\Omega] \times I[\mathrm{A}]$$

要测量某种材料的电阻，就要让电流流过这种材料再测量材料两端产生的电压。



那样，就能得知相当于比例常数的电阻值。

采用这种测量方法，电流通过材料时，材料会发热，

温度就会升高，所以要小心操作。

好烫！

材料

因为电阻会随着温度的变化而变化，

所以测量方法也

啊，只要明白了原理就足够啦！

那么，少爷，电阻值会随材料形状的变化而变化吗？

咦？

好像粗的电线中通过的电流量更大，

而电线越长，电流越难通过，我认为是这样的。



● 电阻率

我们将这种状态下测到的电阻，称为“电阻率”。

Ω·m

它的单位是Ω·m。

这些都是真实的电阻率。

铝：2.8
金：2.4
银：1.6
铜：1.6
纯铁：8.9
锌：5.9
锡：11
铅：19
水银：94

（在0℃状态下的值）引自《理科年表》

上面的单位都是10^{-8}Ω·m。

2 硅和锗

那么，半导体，也就是硅和锗的电阻率是多少？

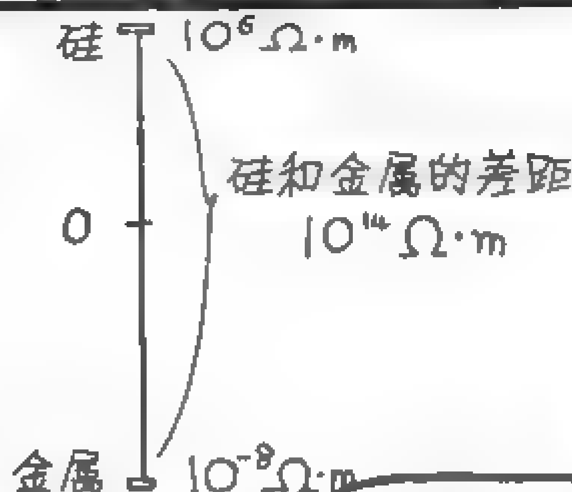
在常温下(20℃)大约是$10^6\Omega\cdot m$。

电流

$10^6\Omega\cdot m$

刚才的金属都是$10^{-8}\Omega\cdot m$。

也就是它们的电阻率是金属的10^{14}倍。

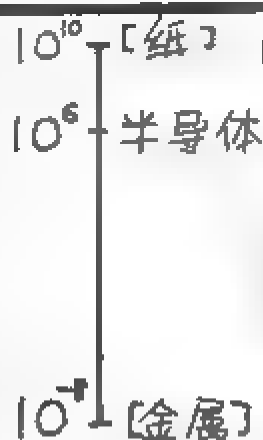


竟然相差这么多！！

经常被用作绝缘体的陶瓷，其电阻率约为$10^{14}\Omega\cdot m$。

还有，绝缘体纸会随着种类和温度的变化，其电阻率会在10^6到10^{0}这个范围内发生很大的变化。

半导体



……

单是通过数字对比，也不能说“半导体就是拥有中间性的导电特性的物质”。

因为绝缘体纸的电阻率也可能是$10^6\Omega\cdot m$，那么似乎就可以说硅也是绝缘体了……

那个……

嗯

哎呀，反正说法很多。

比较在常温下的电阻率来讨论半导体没有什么太大意义。

啊?

● 电阻率对温度的依赖性

半导体最大的特性就是其电阻率

对温度的依赖性。

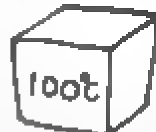
决定电阻率的要素是运载电流的电子（传导电子）的密度。

金属每立方厘米的电子数大约有10^{23}个。

另外，纯粹的晶体硅在常温状态下每立方厘米的电子数大约有10^{10}个。

硅



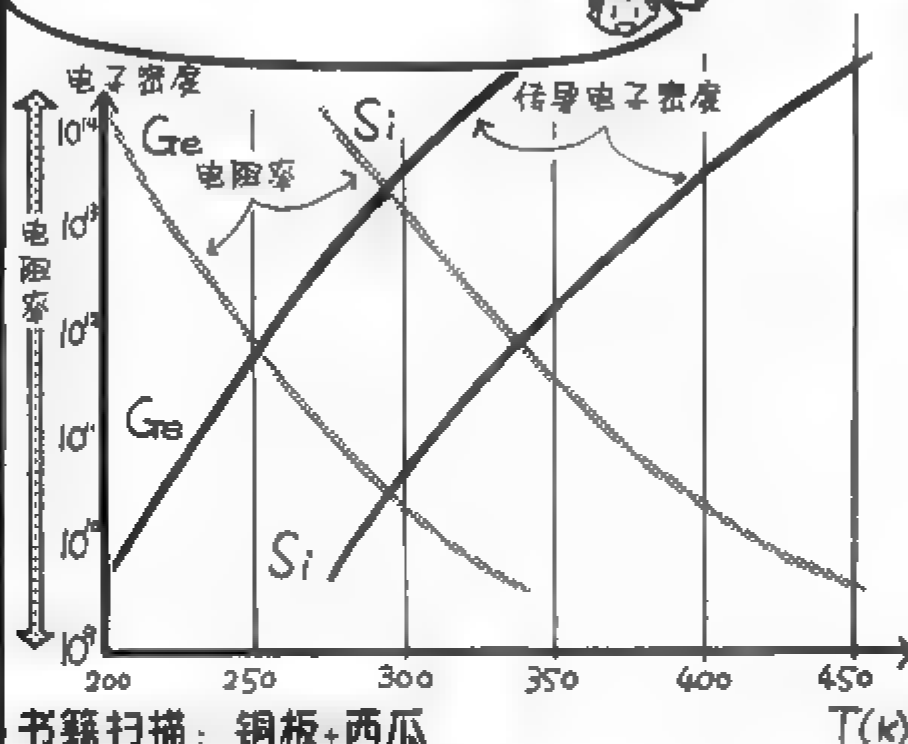




但是，

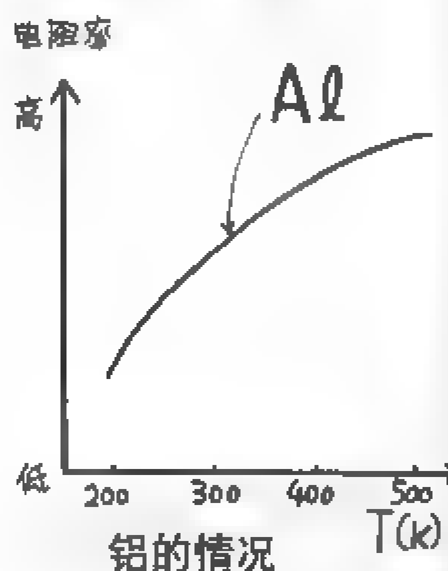
100℃时,电子数约为2×10^{12}个，为常温状态下的200倍。
300℃时,电子数会增加到2×10^{14}个，与绝缘体相比其导电性能要好些。

也就是说，包括硅在内的所有半导体，随着温度逐渐升高，其电阻率就会不断变小。



因为电子数增加了，所以电阻率就会变小。

同时，如果是金属，随着温度逐渐升高，其电阻率会逐渐增大。



铝的情况

正好与半导体相反啊！

要说明金属与半导体的电阻率为什么对温度会产生不同的反应，

就要知道它们内部的电子是如何移动的。

唉，

半导体好复杂啊！

复杂？

现在围绕半导体讲解的这些知识还只是入门知识哟。

● 延伸知识和技术

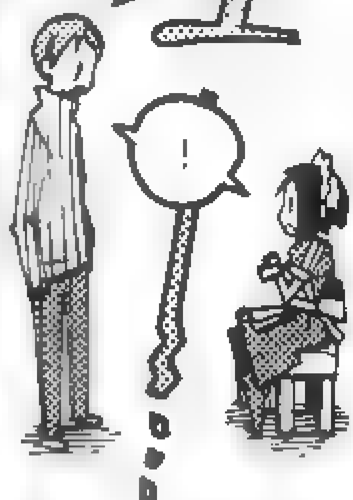


"半导体"的相关学问和技术大概就是这些内容。

这些内容并不是都能用物理学知识解释清楚的，

但是从量子力学的角度来看，就能够充分了解半导体的特性。

半导体还真有趣！



呀！
我还要准备晚饭呢，现在还什么都没有做。



喂，我们偶尔也应该出去吃一顿吧！

真的吗？少爷！



我去换衣服，马上就来！

我带你去一家比较好的店去吃吧！

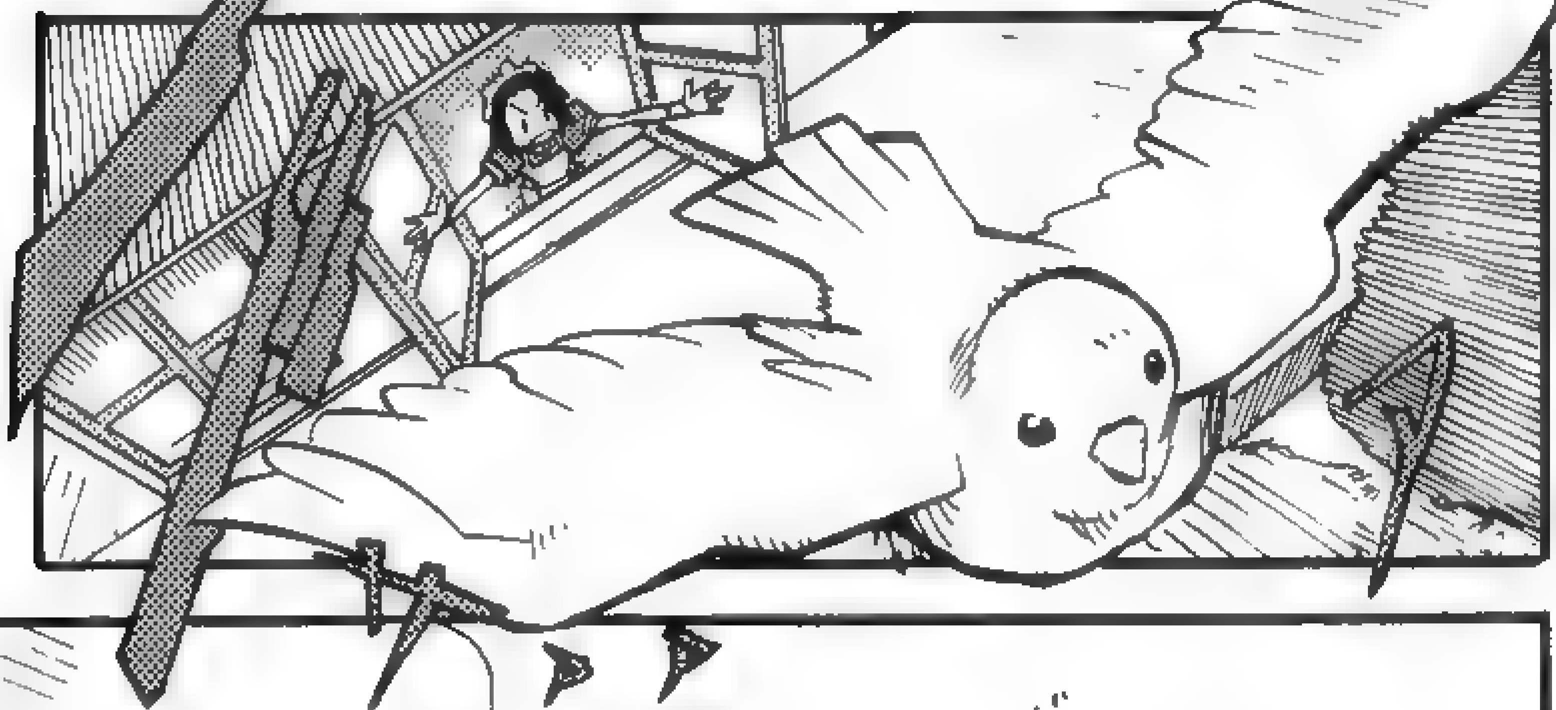





芽衣的房间


咔咔

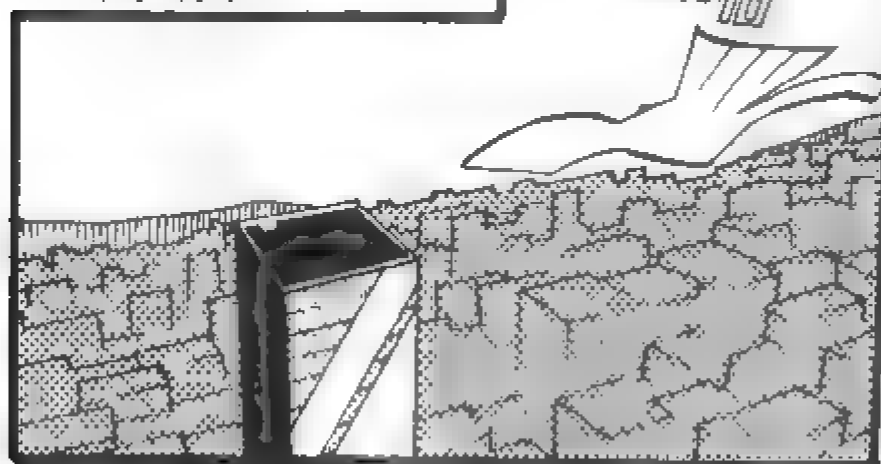



バサ
バサ
芽衣，你还没有换好吗？
让您久等了！
这是我第一次看见你穿佣人服以外的衣服！蛮可爱的嘛！
讨厌！

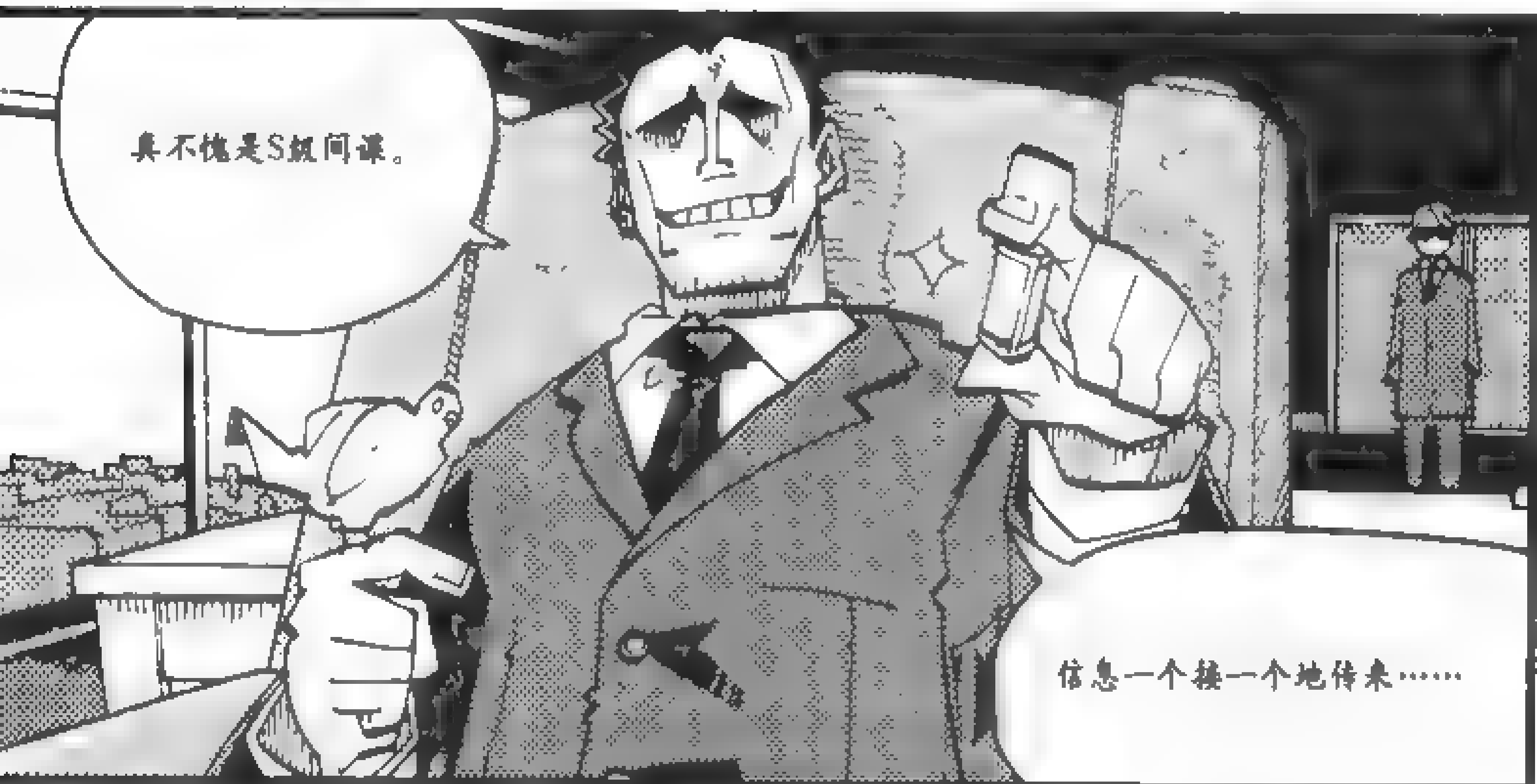
第 4 章

万物之源——原子

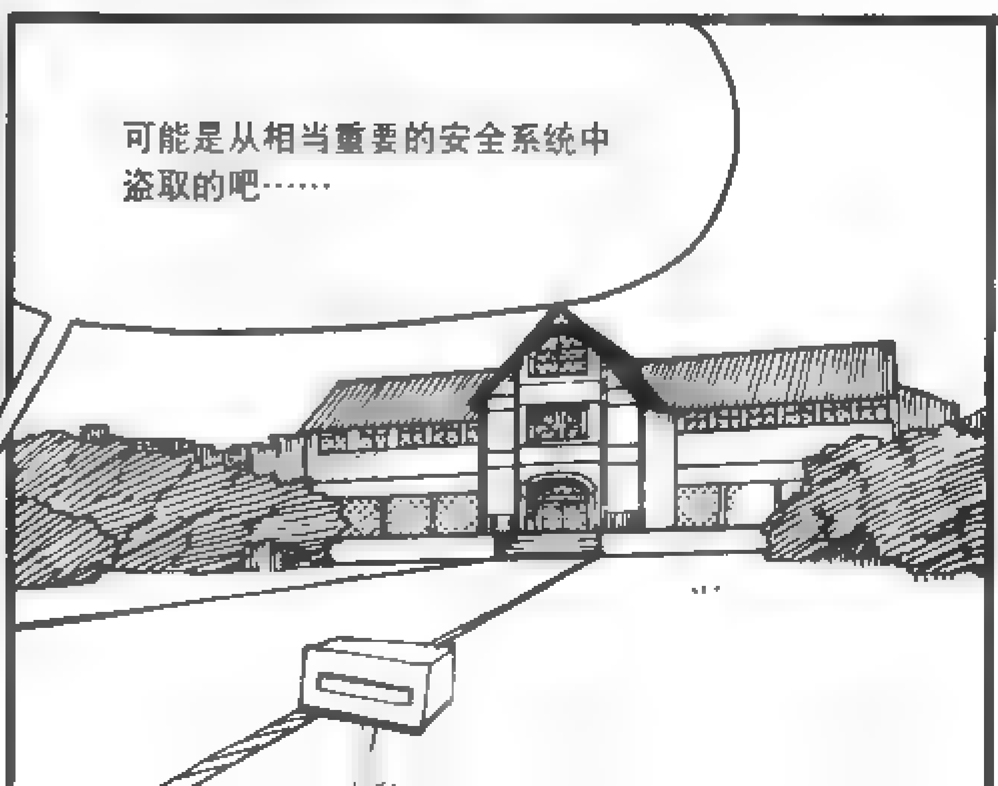
1 原子结构和元素周期表



















他这人真不错，不过好像太傻了吧，随便就把钥匙之类的东西交给别人。

竟然不知道我是产业间谍。

不过，这么大的信息量，不知道什么时候才能够完成任务，也不知道哪些是重要的。

干得怎么样了？都打扫完了吗？

还差一点！

那么，今天我们就来讲一讲

万物之源——原子。

关于原子结构的解释虽然已经发生了历史性的变迁，但是简单地说，

原子是由位于中心位置的原子核和包围着原子核的电子组成的。

电子

原子核

原子核由带正电的质子和不带电的中子组成。

质子（+）
中子

并且，电子带负电荷。

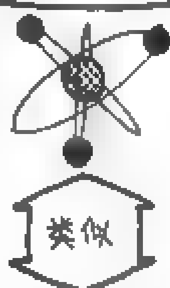
电子
（－）

那些东西真的存在吗？

我们用肉眼是看不见的。

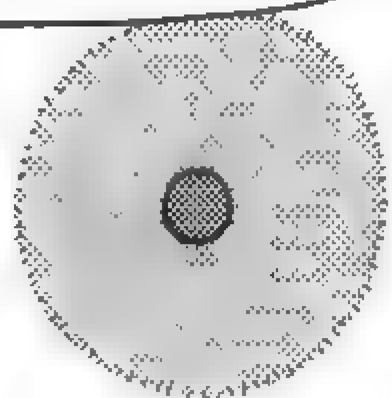
努力

以前人们一直认为电子就像是围绕在太阳周围的行星一样，所以被称为“行星模型”。



太阳

但是也有人认为电子是像云一样散布在原子核的周围。



这就是量子力学的观点。

当原子中的电子数量很多时，电子是如何包围着原子核的？

电子都各自依靠着自有的能量，在原子核的周围运转着。

不过，它们并不是无视其他电子的存在而任意地无规则地运转。

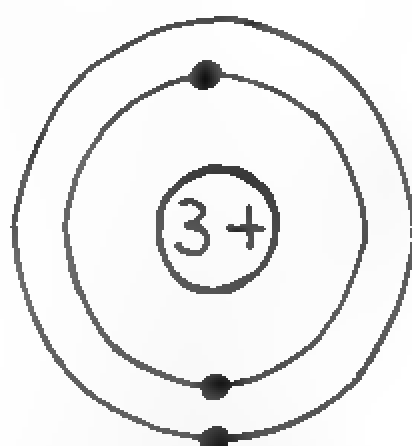
电子还很认真踏实？

并不是那样！

● 电子的能量状态

各个电子所拥有的能量并不是可以连续地取任何值。

电子能量状态属于量子力学运动范畴，要取其离散值。



并且，一个能量状态只能有一个电子进入。

那么，一个又一个的能量状态是由什么决定的呢？

决定单原子周围的电子能量状态的，

哦！

主要是主量子数（n），

还有轨道量子数（l）。

有外加磁场时，（l）的能量状态能够进一步分离，

其量子数为（$2l+1$）个。

$2l+1$

我们将这个量子数叫做

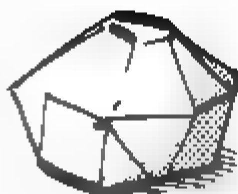
磁量子数（m）。

在探讨半导体的单晶体时，

电子轨道的概念是很重要的。

哦！

不过，电子轨道不属于单原子的范畴，



……

而是要探讨在大量的原子聚集起来结合成晶体后的状态下的电子轨道。

轨道量子数（l）一般为0、1、2、3、…一般都等于主量子数（n）减去1。

轨道量子数（l）=（n−1）

并且，那样一来固定的（l）号都有一个名字。

当（l）=0时，为s轨道

当（l）=1时，为p轨道

当（l）=2时，为d轨道

当（l）=3时，为f轨道

当（l）=4时，为g轨道

g轨道

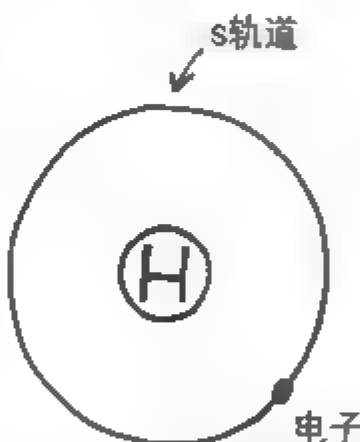
f轨道

s轨道

p轨道

d轨道

比如氢原子，因为它的电子数为1，



所以它最低的能量状态为（n）=1，（l）=0（s轨道）。

哦！

我们将这种情况下的状态表示为1s1。

1s轨道

电子

在1s轨道中有1个电子进入。

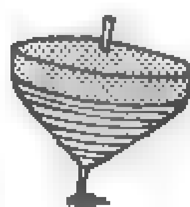
因为1s是一种能量状态，所以这里就只有一个电子进入，你有这样一种感觉吗？

嗯！

但是，还有自旋量子数，它能够取两种状态。

对于这个量子数的概念，可以将其比喻为旋转的陀螺。

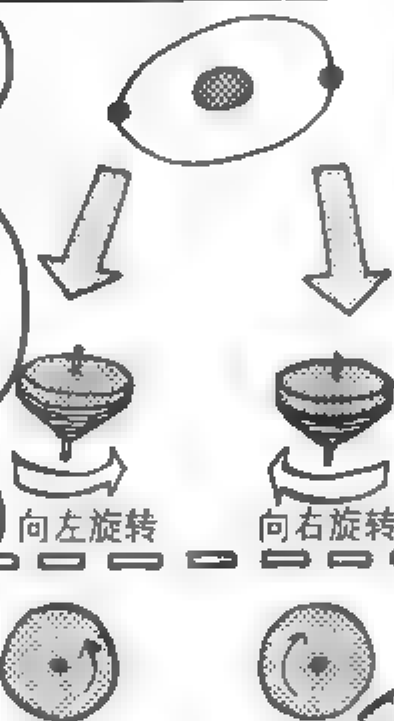
陀螺？



如果用陀螺来表示两种状态，

就相当于陀螺向右旋转时的状态和

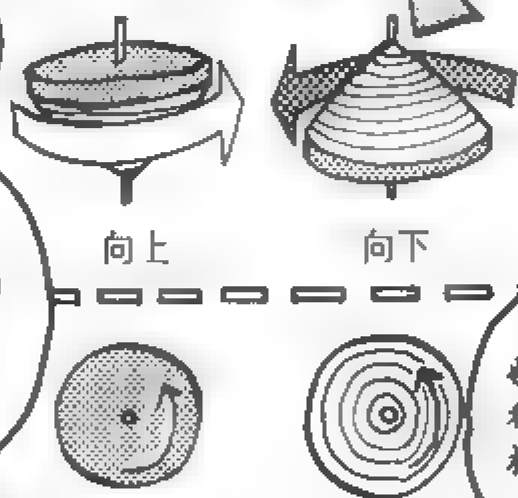
陀螺向左旋转时的状态。



陀螺旋转情况如所示

如果旋转的方向一致，

就可以表现为陀螺的轴向上的状态和向下的状态。



也就是说，两种表现都是一样是吧。

我们将这些表现总称为自旋量子数，有时也用"+"和"−"来表示。

+	−
向右旋转	向左旋转
向上	向下

也就是说，根据自旋量子数，每个轨道可容纳两个电子。

我们将能够进入一个轨道的电子数叫做"轨道可容纳的电子数"。

电子轨道可容纳的电子数是轨道量子数2倍加上1后的和的2倍。

电子轨道可容纳的电子数 $= (2l+1) \times 2$

原来是这样！

具体来说，就是这样！

s轨道 2个

p轨道 6个

d轨道 10个

f轨道 14个

各个轨道可容纳的电子数都一目了然了啊！

简单地总结一下就是这样！

电子轨道可容纳电子数的坐标分布图

主量子数（n）	=	1	2	3	4
轨道量子数（l）	=	0	1	2	3
		↓	↓	↓	↓
轨道的名称	：	s	p	d	f
轨道内可容纳电子数：		2	6	10	14

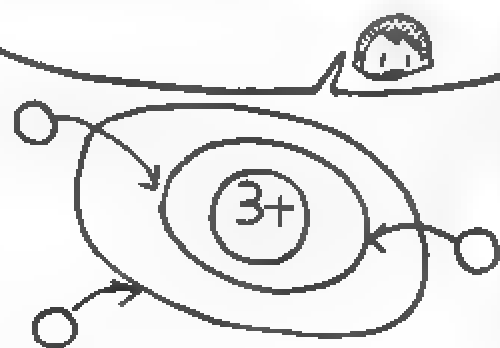
磁量子数（m）$=-l$、…、0、…、$+l$，共有$2l+1$个取值（当有外加磁场时，能级会分离）

自旋量子数（s）=+和-（或者向上和向下）

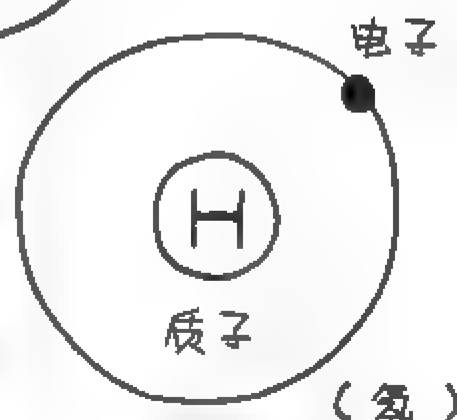
只要掌握这个法则就不难了吧！

在单原子的情况下，

通常（原子号较小的原子）从下面的轨道（主量子数小并且轨道量子数小）开始依次填充可容纳的电子数，



并且原子序数是由原子核中的质子数所决定的。



关于包围在原子核周围的电子数……
因为单原子都应该是中性的，

质子

电子

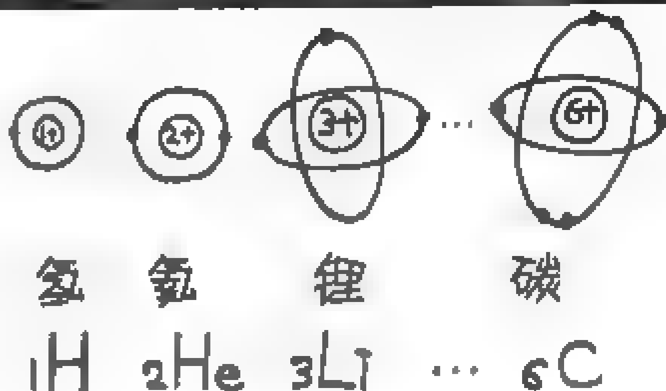
所以，电子数=质子数！

那么，原子数为2的He（氦）原子的电子和质子数都是2?

那当然啦！

也就是说，

电子的数量会随着原子序数的增大而逐渐增加。



并且，好像原子都是被命名后，再按照原子序数的顺序将其名字排列在“元素周期表”中的。

元素周期表

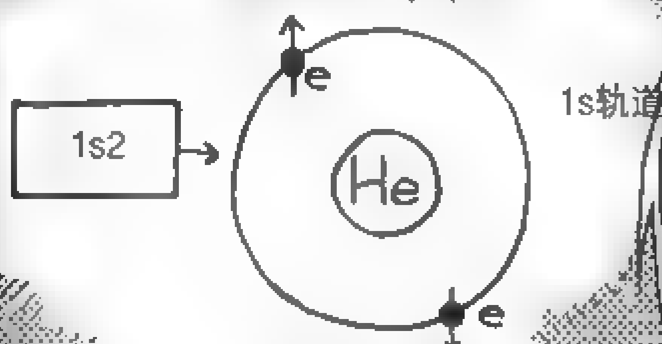
镧系元素

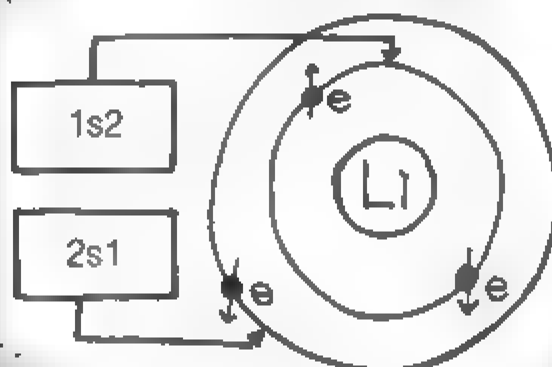
在学校的教科书中曾见到过！

与原子序数相同数量的电子是如何进入电子轨道的呢？

因为根据自旋量子数来考虑，每个电子轨道能够容纳两个电子，所以就是这样！

当原子为氦和锂时，





哦！自旋！！

怎么样，简单吧？

嗯！

……

元素周期表也很重要。这个你没问题吧？关于其详细内容请参考本书第184页！



“氢氦锂铍硼碳氮氧氟氖”，没问题！我已经会背了！



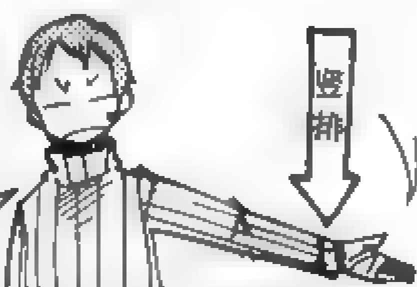
元素周期表

镧系元素

锕系元素

很好！

除了可以按照原子序数的顺序来背诵元素周期表，还应该仔细看一看竖排成一列的元素





啊？是吗？

● 整流特性

还有，

最先发现的半导体特性就是位于元素周期表中的锗原子的整流特性。



整流特性？那是什么？

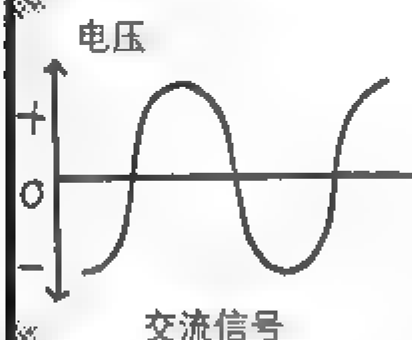
所谓整流特性是指只让交流信号的一个极性的信号通过。

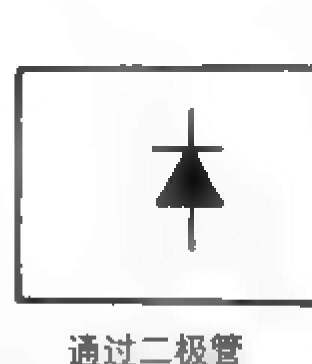
交流信号源

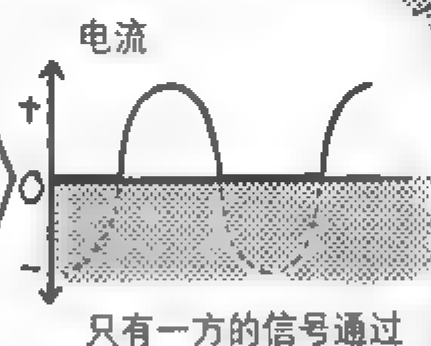
金属针

锗

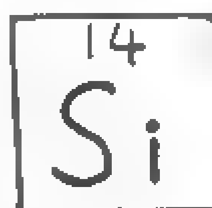
测定信号波形的装置







那么，我们再讲一下我们更关心的理论物理学话题，那就是以后比锗还实用的硅。



现在被作为“半导体材料”使用最多的就是硅，让我们来详细介绍一下“硅”吧！

丰胸手术也会用到的硅，它和我们生活真是密切相关！

喂，喂！

它也在元素周期表中哦！

哇？

硅（Si）位于第3周期14族（旧的分类为Ⅳ族）。



真的在周期表中啊！

看它上面的周期（第2周期14族（Ⅳ族）），那儿是碳（C）。

再看它下面的周期（第4周期14族（Ⅳ族）），那儿是锗(Ge)。

锗和硅的单晶体与钻石（碳的单晶体）具有相同的晶体结构。

钻石！

哇——噢



你很喜欢钻石？

是啊！

因为它与硅一样也位于第14族，所以有人猜想“钻石是不是也是有效的半导体材料？”并且也有人正在做这个研究。

在这里我们就不再深入探讨这个问题了。

只说硅和锗就可以了！

真遗憾！

唉

● 原子的组合、分子和晶体

我再稍微介绍一下元素周期表吧！

在第三周期元素中，2族元素的下面接着就是13族，从3族到12族之间都没有分配元素，对吧？

这到底是为什么呢？

这与电子轨道有很大关系。

第2周期的元素，当1s轨道被电子装填满后，电子就会装填2s轨道（Li和Be）。

能量

2p

2s

1s

O 原子中心

能量

4p

4s

3d

3p

接下来就会依次装填2p轨道，在第2周期中有6种元素（从硼（B）到氖（Ne））都适用于2p轨道。

3s

2p

2s

1s

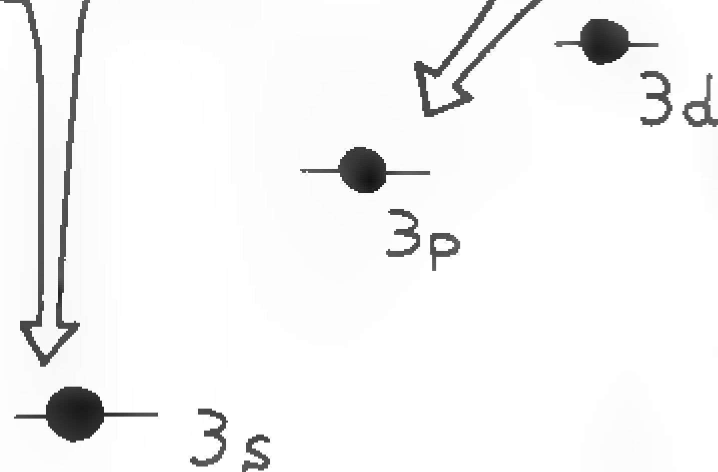
O 原子中心

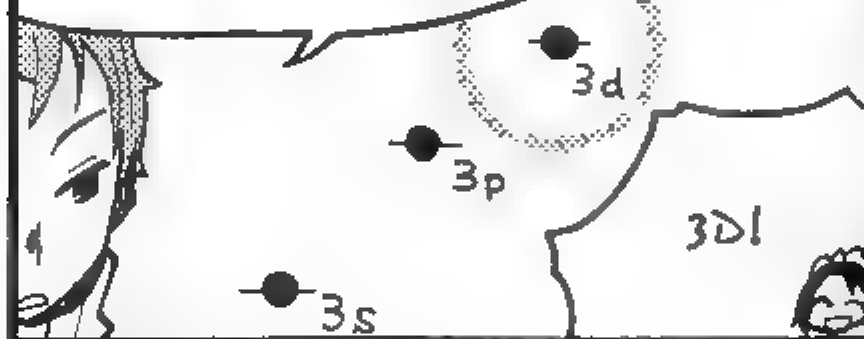
电子轨道距离原子中心的距离

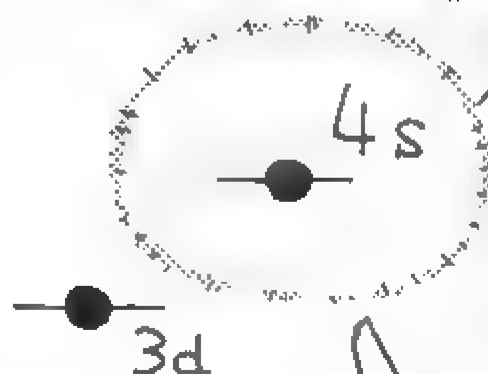
第1周期的元素，装填电子的只有1s轨道，当可容纳电子数装填满后，就会转移到下个周期。

第3周期的元素，当1s、2s、2p轨道被电子装填满后，电子就会装填3s轨道（钠（Na）和镁（Mg））。

接着会依次装填3p轨道，在第3周期中有6种元素（从铝（Al）到氩（Ar））都适用于3p轨道。




那么，第4周期的元素的电子会进入哪个电子轨道呢？
3d
3p
3s
3D!
不对！
喂？
应该是按照这个顺序的啊？


实际上，在此之前会先装填第4周期元素的轨道排列中的4s轨道，
4s
3d
之后再装填3d轨道（有时候4s轨道只有1个电子）。
3p
3s
当4s2、3d10装填完后，再开始装填4p。
在3d轨道装填10个电子的元素相当于现在3族到12族的10列元素，
这
样
据说这是因为3d、4s比较接近。





看这里，C（碳）元素原子的电子排布为1s2、2s2、2p2，电子轨道中一共有6个电子。

而Si（硅）元素原子的电子排布为1s2、2s2、2p6、3s2、3p2，电子轨道中一共有14个电子。

哦!

2p
1s
2s
C

《碳》

3p
3s
2p
2s
1s
Si

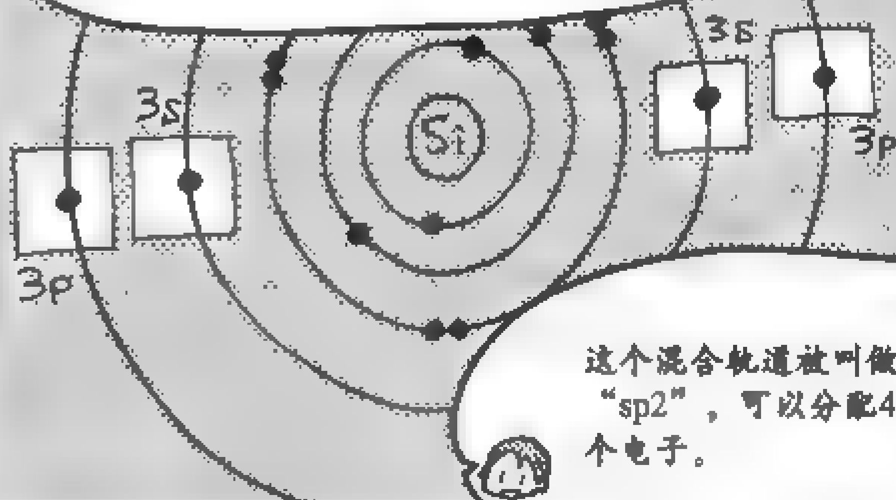
《硅》



共用轨道的现象不会发生在单原子中，而是发生在几个原子结合成分子和晶体时。

硅原子在结合成单晶体硅时，

3s的2个电子和3p的2个电子就会共用轨道。



这个混合轨道被叫做“sp2”，可以分配4个电子。

这就是在半导体入门书中提到的“Si的外围电子为4个”这一说法的依据。

确实是这样写的。

？

外围电子，也就是最外层的电子的个数不是2吗？

从单原子看，因为装填电子到3s2后，就只有装填为3p2了，所以容易让人认为外围电子数为2。

但是，实际上3p和3s的电子形成了共有轨道，所以外围电子数为4。

因此，就出现了拥有4只胳膊的原子图。





这是在入门书中常用的表示方法，显示的是平面结构图。

但是，这是实际的形态。

哦!

Si

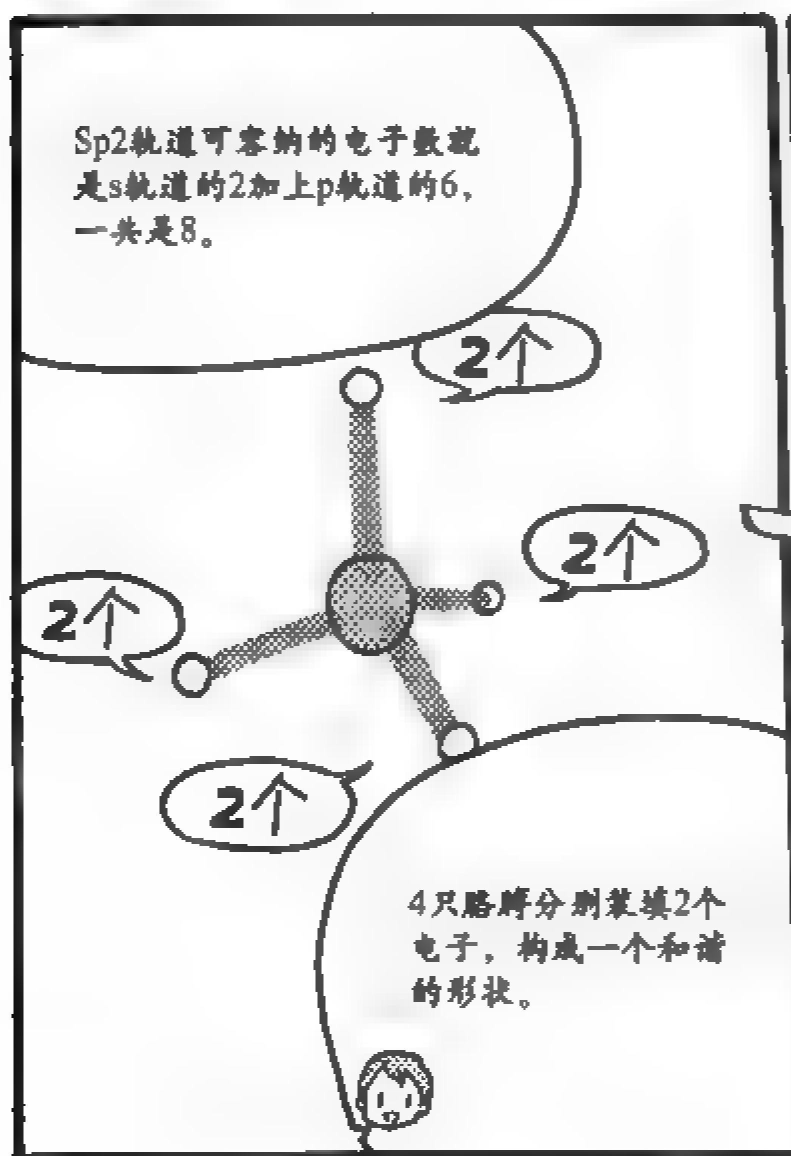
参考书中叙述的例子

实际的形态

有4只胳膊吧？

Si

哦，是4只！

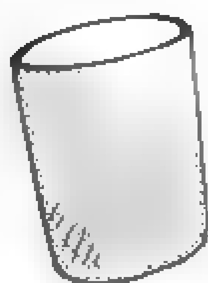




那么，在分子结合成单晶体时，这4只胳膊作为主体结构会如何伸展呢？这也是个问题。
？
为什么它会是个问题呢？
比如，如果这4只胳膊从原子的中心在同一个平面向上下左右这4个方向伸展的话……
什么？
布？
如果是那样的Si原子的话，就会无限地连接，伸展成平面状吧？
但是，其厚度就只有1个原子那么厚。
不过，即使是伸展成那样，用肉眼也是看不见的啦！

实际上，单晶体硅的结构是滚动的立体状，

用来制作半导体器件的硅（被称作硅锭）是圆柱状的。

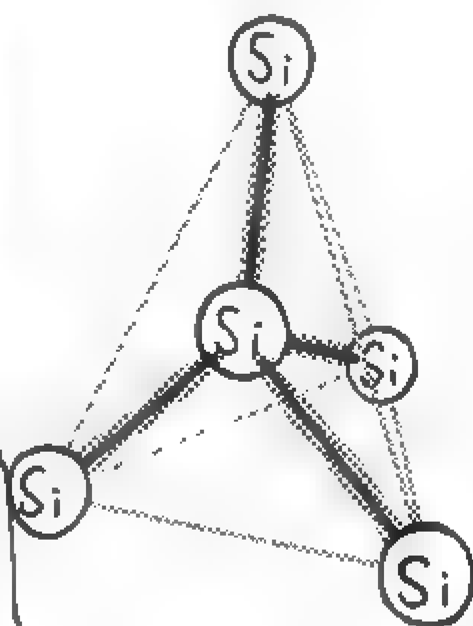


那么，

硅原子是如何伸出4只胳膊构成那样的晶体的？

就是在正三角锥的中心放置一个原子，

从这个中心向三角锥的顶点伸出胳膊，这4只胳膊就能够形成对等（公平）的形状。

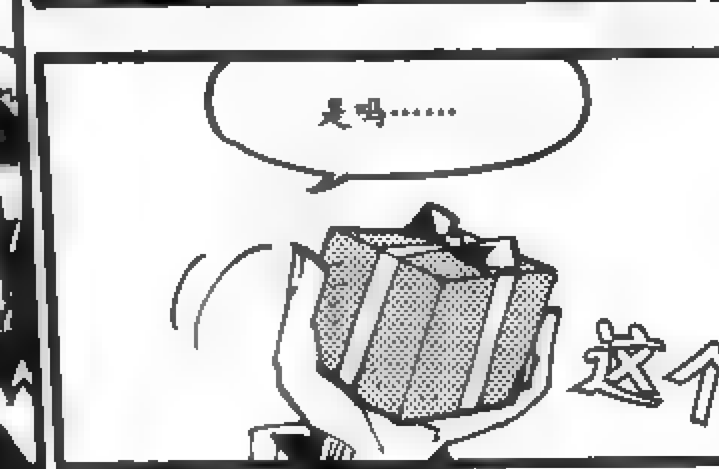


好几个那样的形状连接起来
就是这样！

这个结构就叫做“钻石结构”。



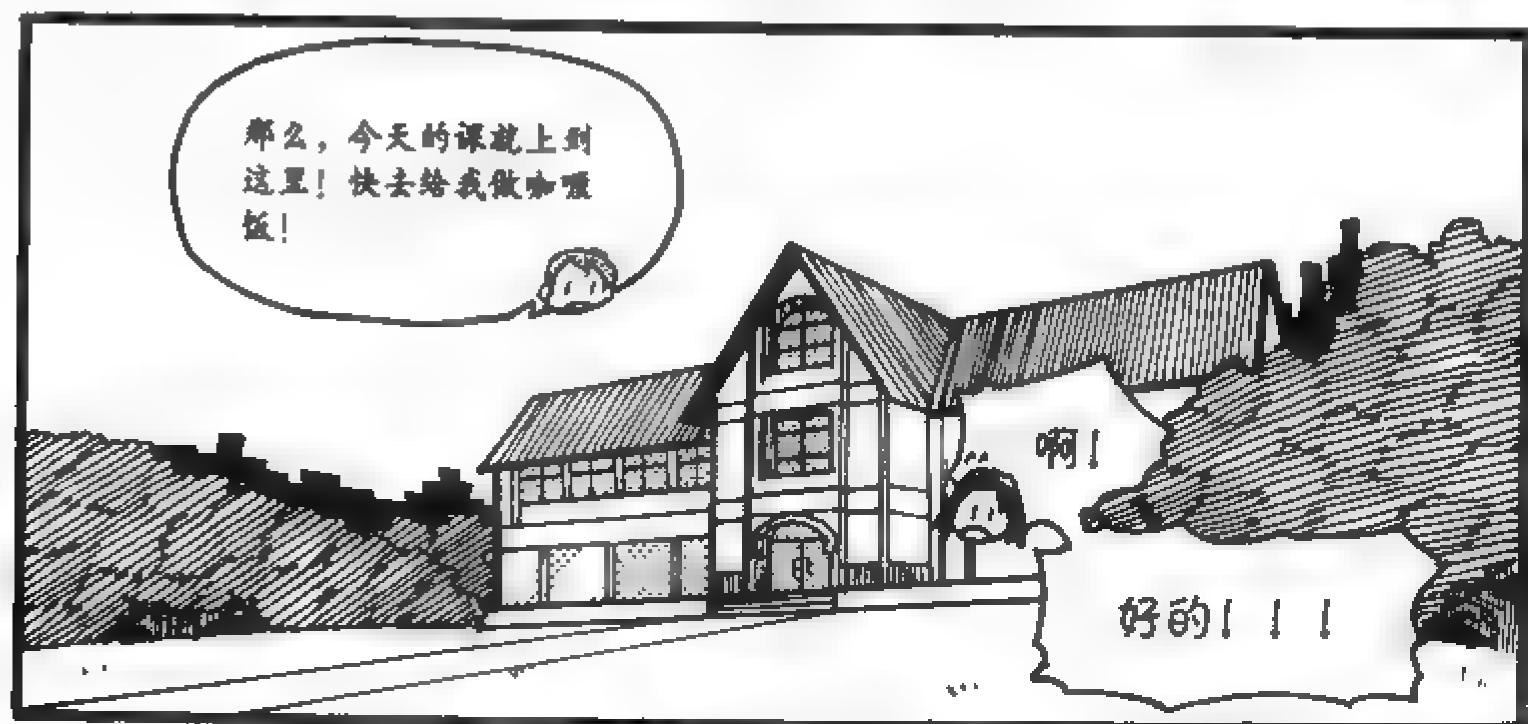





这是什么?
咦?
礼物……


礼物……给我的?
但是现在还不能打开!要等所有的课都讲完了再打开!


……


那么,今天的课就上到这里!快去给我做咖喱饭!
啊!
好的!!!

2 后　续

元素周期表的补充说明

回忆一下刚开始学习元素周期表的时候，有可能会记起平常我们都是像读文章的行一样，从元素周期表的左上角开始向右依照“氢氦锂铍硼碳氮氧氟氖……”这样的顺序来背诵的。

但是，说到底元素周期表是依据“周期和族”来总结编排的，按照一系列的序数依次来背诵其实没有多大意义。

那么，周期律是从何处着眼才得以发现的呢？其实，它是以某些元素化学反应的相似性为基础构想出来的。

门捷列夫在发表元素周期表的构想时，并没有引起多大的反响。但是，之后以这个表为基础，一些新元素不断地被发现从而填补了表中留出的空白部分，这样人们才逐渐理解了元素周期表的真实价值。

比如，氯（Cl）可以形成“NaCl”和“KCl”这样的化合物，它们的晶体结构也相同。由此我们可以判断“Na”和“K”具有相似的性质。另外，“KBr”这种化合物也会作为晶体存在，比较一下“KBr”和“KCl”的晶体结构，就能够推测：或许Cl和Br也具有相同的性质。

“元素周期表”就是像这样通过对比和探索化合物而制作出来的。

但是，也有不发生化学反应的元素。它们就是被称为“稀有气体”或“惰性气体”的一族。即He、Ne、Ar、Kr、Xe、Rn。

关于族号的表示方法，最初并没有像现在这样把各周期（元素周期表横向的一行）分成18族（纵向的一列）。旧元素周期表是使用罗马数字（Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ、…）来表示族号的，但是在新的元素周期表中，是用阿拉伯数字来书写的（现在旧元素周期表中的族号也改用阿拉伯数字书写了，不过在本书中为了尊重半导体产业的习惯和明确新族和旧族，也同时使用罗马数字标示出了旧元素周期表的族号）。

首先Ⅰ族元素分为Ⅶ族和0族，现在的13族～17族以前被叫做Ⅲ.A族～Ⅶ.A族,现在的3族～7族以前被叫Ⅲ.B族～Ⅶ.B族。并且Fe、Co、Ni现在所在的8族～10族以前被统称为Ⅷ族。

在新元素周期表中，11族和12族的Cu、Zn所在的位置在旧元素周期表中记为Ⅰ.B族、Ⅱ.B族。把以前的旧族重新分类的最大起因就是，只通过化学反应的特性来给元素周期表分类还不能很好地掌握各类元素的性质，而当把原子序数按照顺序排列时，能够从物理的角度去解释电子轨道最外层的状态。

不过，现在作为半导体材料利用得最多的还是Si（硅）。按照现在的族号来讲，Si位于元素周期表的14族。但是，处理半导体的人依然习惯用旧族号来称呼它。在元素周期表中，Ge（锗）位于Si同族的下一周期中。在历史上，锗是先于硅之前被作为半导体研究的对象。这样看来，与Si同族的位于其上一周期中的C（碳）也极有可能会成为半导体研究的对象。碳的晶体结构中硬度最高的就是与单晶体硅结构一样的钻石结构（在历史上，单晶体碳的钻石结构最先被发现，因为Si和Ge的单晶体也具有同样的结构，所以也被称为“钻石结构”。按照晶体学的分类来讲，它被称为“面心立方”晶体。但是在面心立方晶格中也有特殊的结构，所以“钻石结构”成为半导体产业中普遍的称呼）。

现在利用人工钻石进行的半导体研究也开始盛行起来，但是还没有发展到作为我们身边的电子产品而得以普及的阶段。

半导体材料中不仅有像Ge、Si这样的单原子晶体，而且还有被称为化合物半导体的物质。比如，有一种半导体就是Ga（镓）和As（砷）以1：1的比例配比而成的化合物。这种化合物写作GaAs，被称作“砷化镓（或者干脆就叫镓砷）”。很多从事半导体产业和电子电路的人都将直接以它的化合物符号来称呼它为“镓砷”，但是物理学和晶体学专业的人士似乎认为与其把“镓砷”这种表现形式当作结晶化合物，还不如将它看作单纯的混合物。

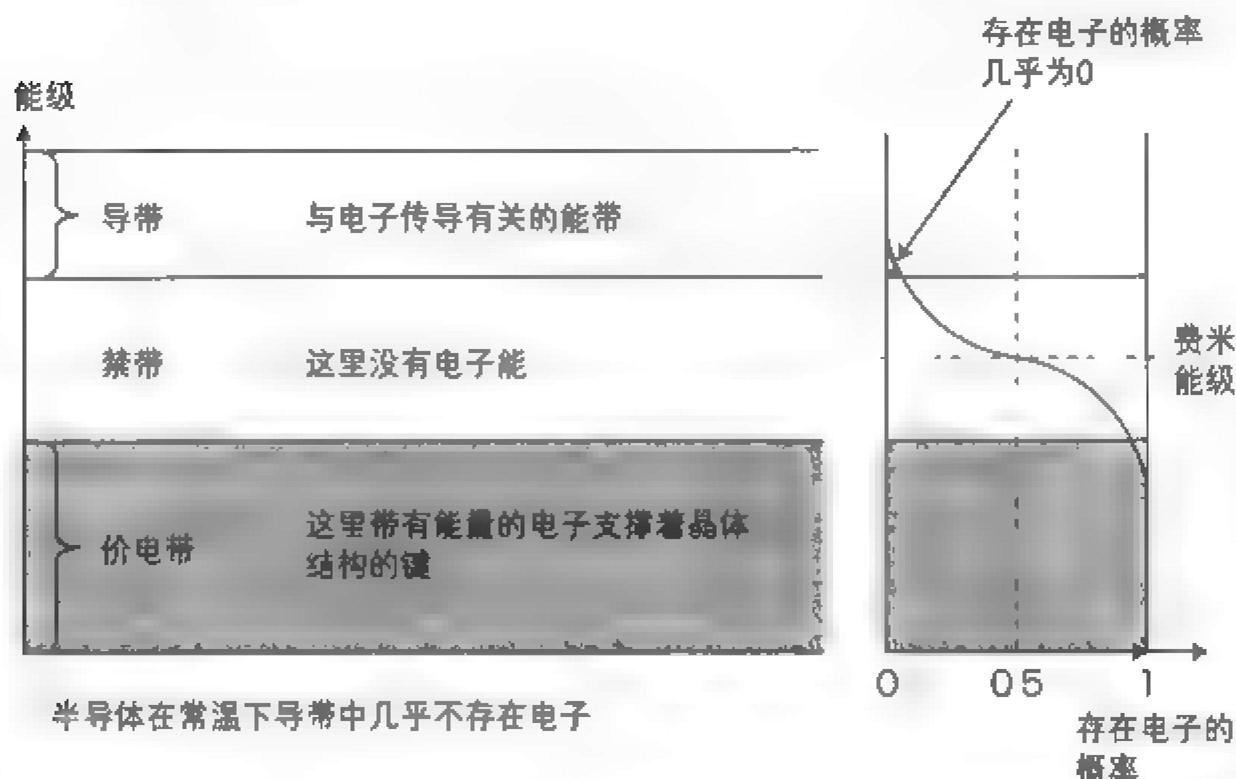
GaAs在高频率电路中，其频率在1GHz（10^9赫[兹]）以上（比如手机的无线频率），是一种使用率较高的半导体材料。

Si、Ge位于旧元素周期表的Ⅳ族，与它们不同，Ga位于Ⅲ族、As位于Ⅴ族，所以把像GaAs那样组合的半导体叫做“Ⅲ-Ⅴ族半导体”。

真性半导体和能带结构的补充

图4-1中所示的能带的例子是指Si的真性半导体（即单纯的晶体硅，不含有杂质的半导体）。

有时我们也将这样的半导体叫做本征半导体。它们都是由“intrinsic semiconductor”翻译过来的。



● 图4-1　能带的例子

单由碳原子形成的具有与Si相同的晶体结构的钻石在常温下是绝缘体。

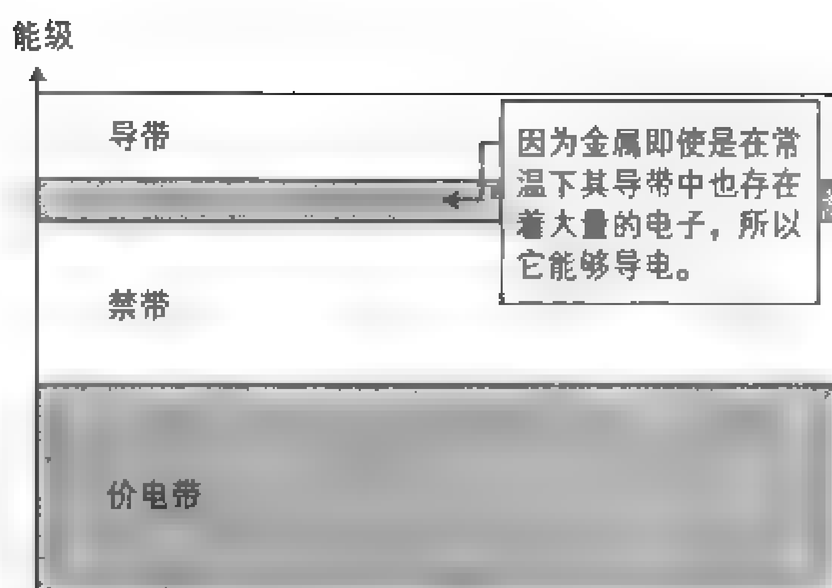
我们经常说“碳能导电”，但是木炭中的“碳”不是单晶体，所以没有如图4-2所示的“禁带”，是能够让电流顺利通过的结构（但是它与铜线等金属不同，可以在电子电路中作为制作电阻器的材料）。

炭确实100%是由碳原子组成的，虽说碳能导电，但是单晶体碳却未必能导电。

并且，我们都知道碳原子像乌龟壳那样排列成板状那样堆积起来形成的石墨具有良好的导电性能。

那么，金属的能带是如何分布的呢？

如图4-2所示，金属在常温下其导带中存在着许多电子，是具有良好导电性能的结构。



● 图4-2 金属能带的例子

像这样，如果有电子摆脱支撑着晶体结构的键（手腕）的束缚，在导带中自由移动，那么电流就产生了。

并且，电子所持有的能量会随着温度的上升而增大，甚至是位于价电带中的电子也有会拥有很大的能量。由此，价电带中的电子会越过禁带进入导带的能量状态。于是，导带中的电子数量会增加，这样导电性能就大大提高了。

当材料为本征半导体时，这种性质即“若温度上升，就能够导电”就是半导体材料的特征。

但是，如果是金属的话，随着温度的上升，金属导带中电子之间的相互作用（相互碰撞）会增强，电子就会难以在导带中移动，因此其导电性能就会变差。

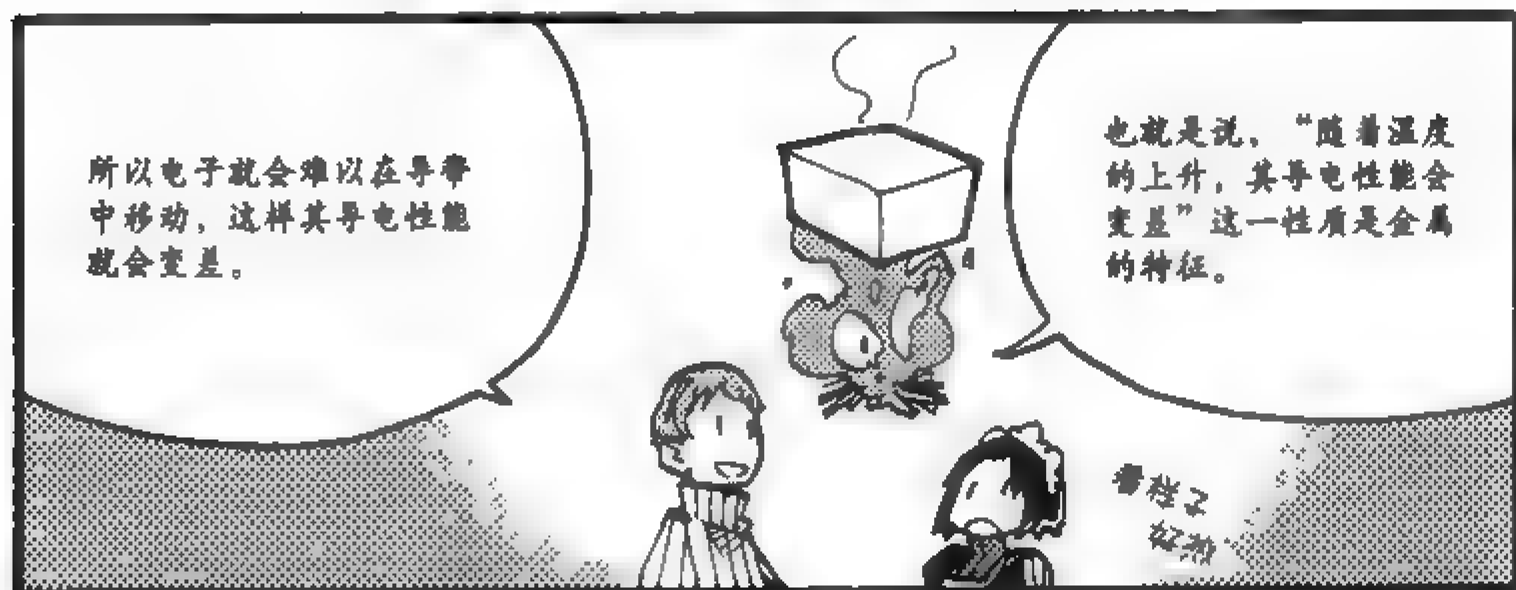
也就是说，金属具有“随着温度的上升，其导电性能会变差”的特征，本征半导体具有“随着温度的上升，其导电性能会更为优越”的特征。

其实，单是以容易导电和不易导电来划分良导体、半导体还是绝缘体并没有太大的意义。我们真正感兴趣的并不是这种材料是否容易导电的问题，而是这种材料如何被应用到电子电路中。

为了了解这一点，在下一章里我们将要讲解“混有少许杂质的半导体”晶体。


嗯……那么，
噢，是半导体材料的特征吧？
在本征半导体的场合，“随着温度的上升，其导电性能会更为优越”，


没错！
并且，与此相反，如果是金属，随着温度的上升，某导带中电子之间的相互作用会增强，


也就是说，“随着温度的上升，其导电性能会变差”这一性质是金属的特征。
所以电子就会难以在导带中移动，这样其导电性能就会变差。


之前你好像说过以容易导电和不易导电来划分良导体、半导体还是绝缘体并没有太大的意义，对吧？
啊，没错！


材料是否容易导电的问题并不重要，
关键在于如何将材料应用到电子电路中去。
原来如此！

第 5 章

混有少许杂质的单晶体硅



这里面是什么呢？

难道真的只是礼物？

难道我的身份暴露了？

呵 呵

看到同埃这么烦恼，真快乐啊！

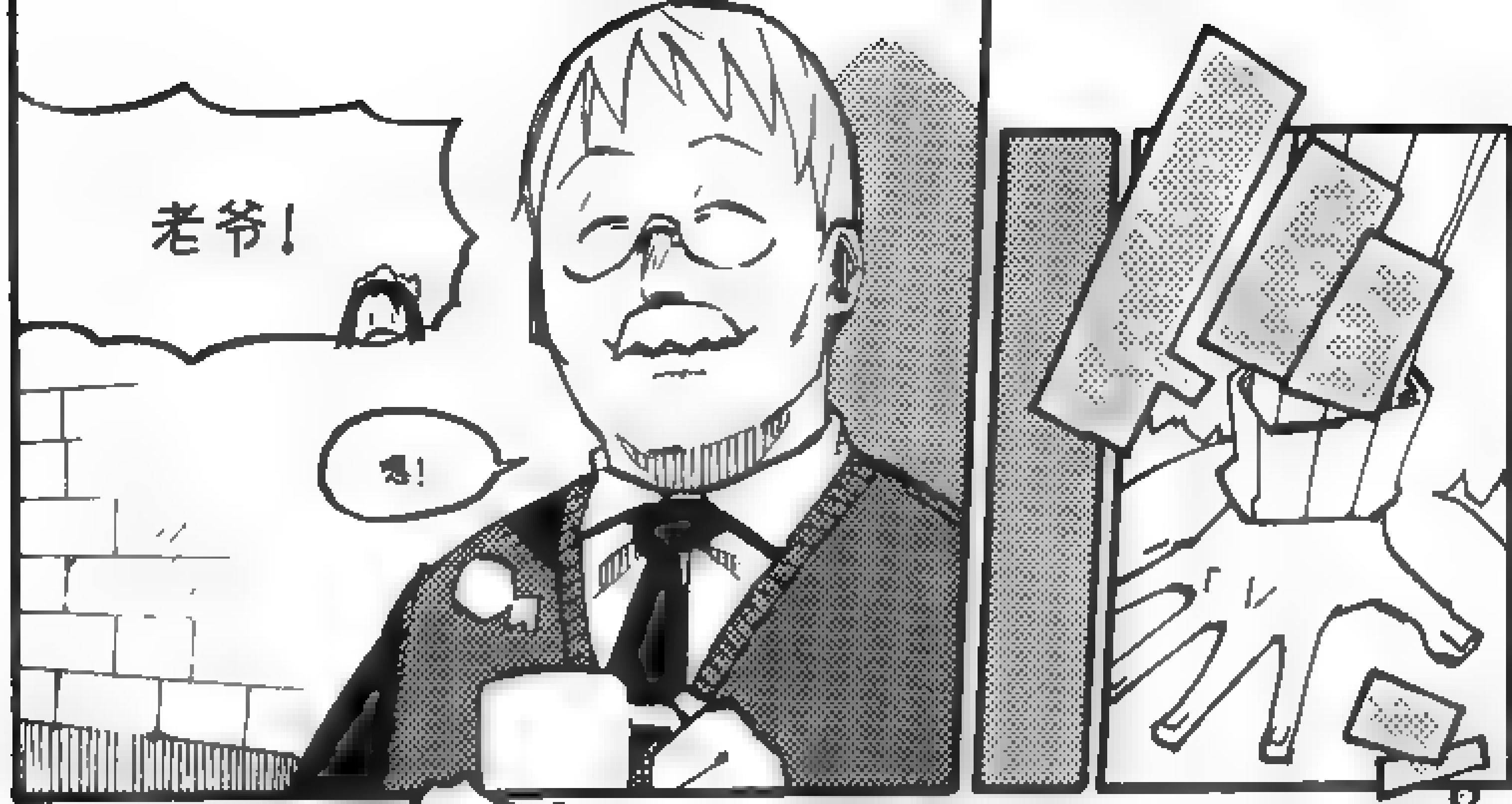
但是现在还不能打开！要等所有的课程都讲完了再打开！

为什么会说那样的话……

哎呀，还是不要想了！以后打开就知道了！

好了

天气真好啊！


老爷！
嗯！


不好！
我回来不好吗？
您总是突然出现！平时都只忙着工作……
现在才说回来……


我的心情不好。
我们去学习吧！芽衣！
好的！


好像还蛮精神的嘛！



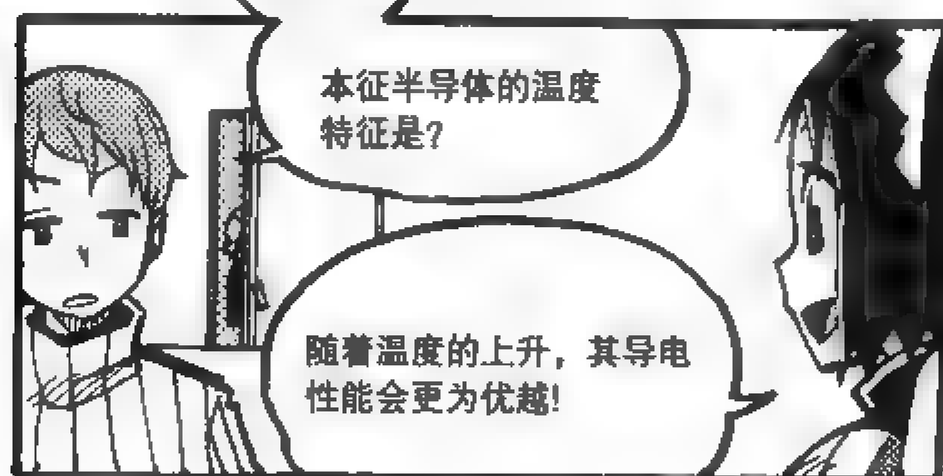
是啊!

再给您来一碗咖喱饭吧!

太好了!







我儿子正在教一位可爱的小姐学习……
我只是想和你母亲一起看看他的英姿……

你给我出去！

可恶！

他说我很可爱！太好了！

确实是很可爱

不过还要多学几道菜！

你是女佣吗？

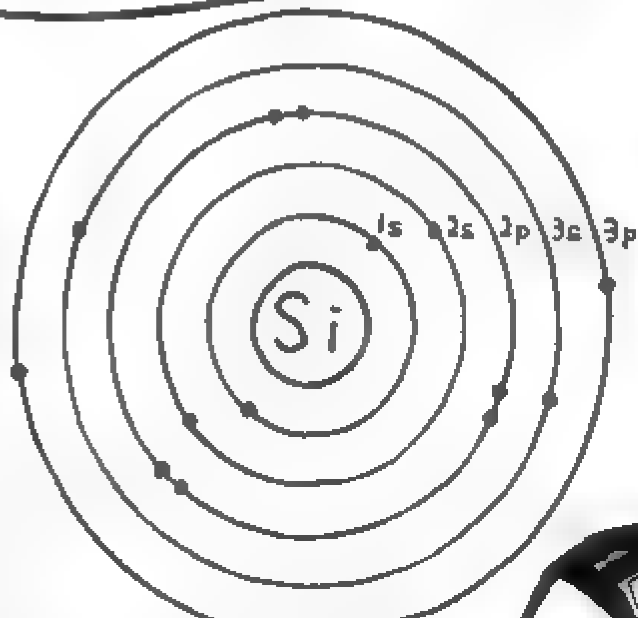
太过分了……

不要生气了！

今天我们要讲一下杂质半导体。

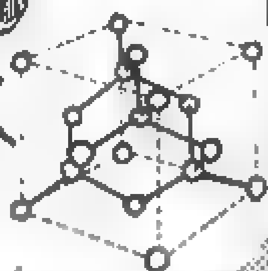
首先，让我们以硅（Si）的单晶体为例来说明一下！

我曾见过这个！



$1s^2$ $2s^2$ $2p^6$ $3s^2$ $3p^2$
（单原子的场合）

那么，这些原子结合而成的结构是什么？



钻石结构！

如果不破坏这一结构，把某处的Si原子换成其他原子的话，就变成了杂质半导体。

嗯……

怎么换呢？



为了不让这个晶体结构发生大的改变，

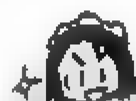
与硅一起结合成杂质半导体的分子的电子轨道（＝分子轨道）必须与单体硅相似！

要使分子轨道的形状与单体硅相似，外围分子轨道必须形成sp2混合轨道。

那么，让我们再看一次元素周期表中硅（Si）周围的元素吧……

咦？

所看到的应该是这样一种情况吧？



13 (Ⅲ)	14 (Ⅳ)	15 (Ⅴ)
5 B	6 C	7 N
13 Al	14 Si	15 P
31 Ga	32 Ge	33 As

做得很好！相对于14族（Ⅳ族）来说，13族（Ⅴ族）或15族（Ⅵ族）最有可能性。



那么，我们首先来了解一下比Si多一个电子的磷（P）。

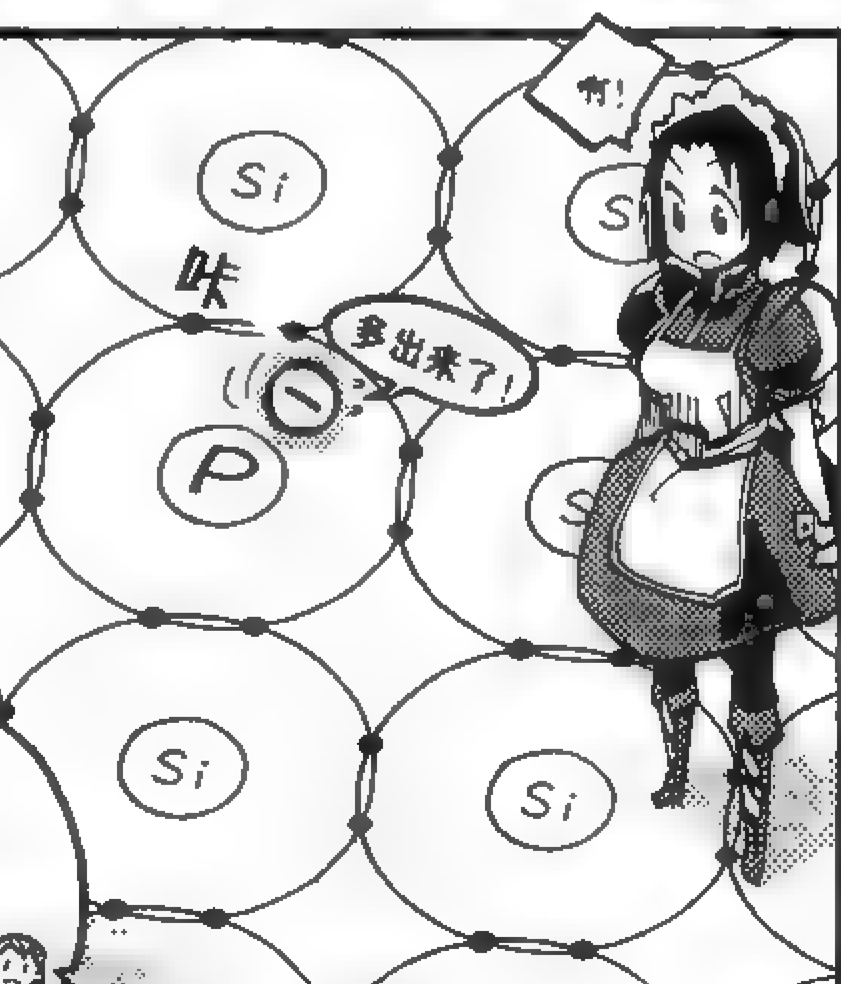


好的！



如果把P装填到单晶体硅中，

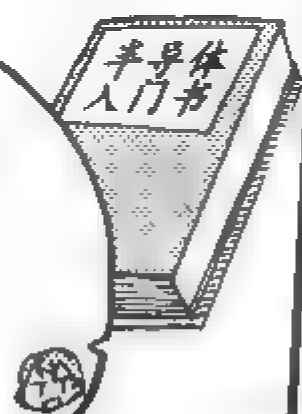
sp2混合轨道的每一个键就分别有2个电子，键的数量（胳膊）为4个。

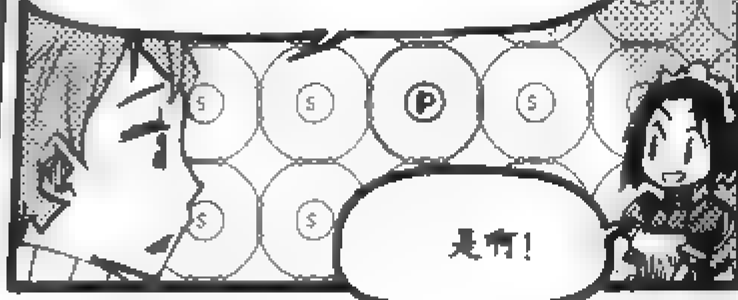


因为P比Si多1个电子，在P的周围就多出了1个电子！



● 晶体不是平面的，是立体的









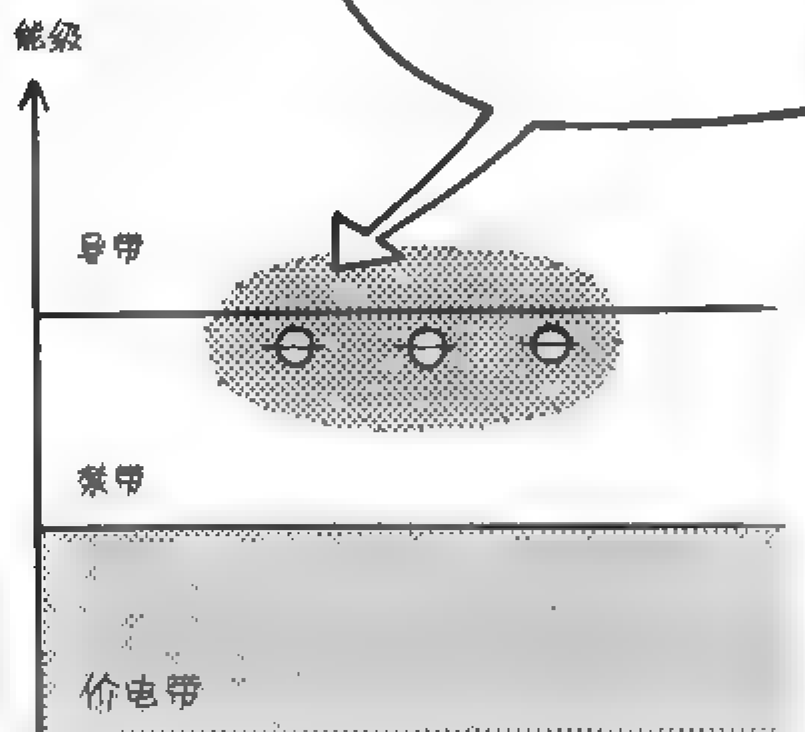


比如，让我们来思考一下当P的原子核位于很多Si原子（Si的大海）中间时，

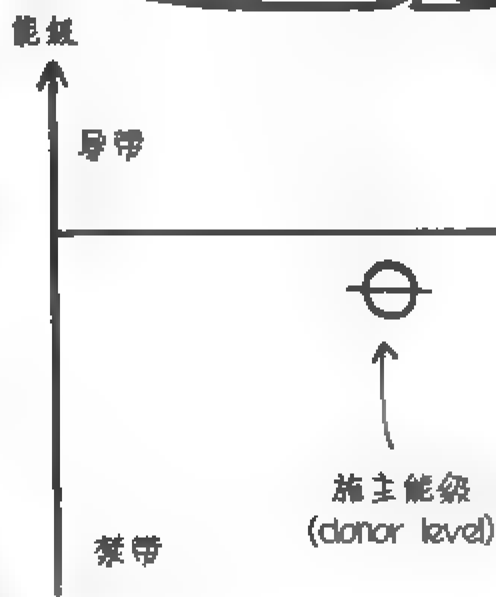
其周围的电子的能量状态会如何变化？

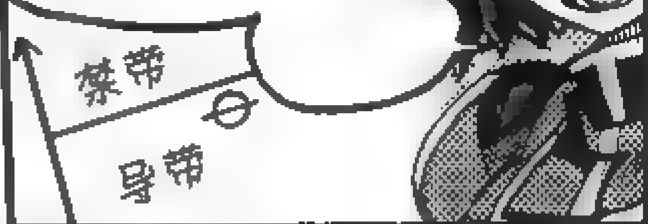
Si的大海

● 施主能级

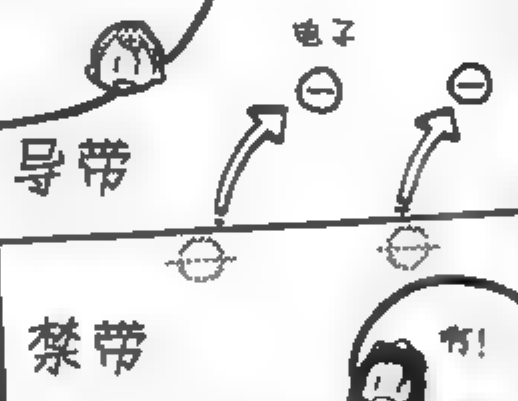

在磷原子（P）的周围，在导带底层附近会形成一个能级。
能级
导带
禁带
价电带


芽衣


我们将这一带的能级叫做施主能级（或授素准位）。
芽衣
能级
导带
禁带
施主能级
(donor level)


不过，
虽然位于原子核附近被离子化的施主能级位于禁带中，
但是它不是离导带很近吗？
禁带
导带


那个位置是非常重要！


施主能级上的电子在室温状态下就能够轻易地进入导带中。
电子
导带
禁带
啊!


进入导带中的电子是不是也像金属一样能够导电?
没错!

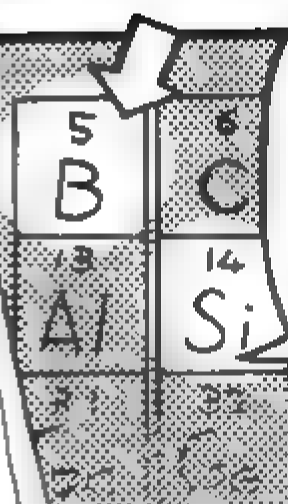

能够导电就是指电子作为“带有负电荷的粒子”会载运电。
实际上的感觉就是拥有波形性质的电子能量会在空间传导。


让我们想象一下，在金属中，粒子一运动，许多电子就会在导带中一边相互作用一边移动。
我们很难想象到它几乎以光速在电线中传导。


我们将以这样的15族的原子作为杂质的半导体叫做“N型半导体”。
P

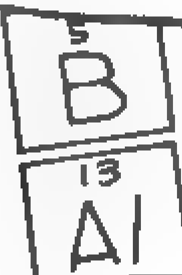


这次我们用比sp2混合轨道的外围电子少一个电子的原子来代替硼原子。



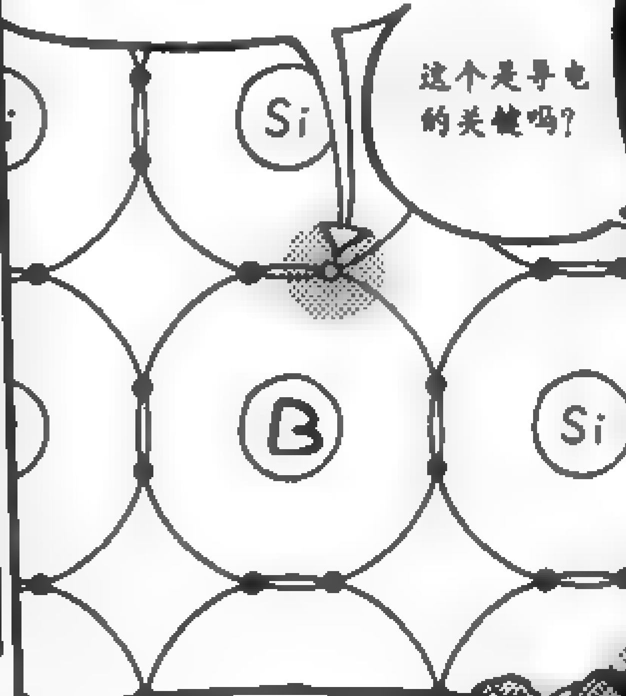
显然在元素周期表中位于Si前面的是铝（Al），但是在半导体中大都利用硼（P）。

为什么要用硼呢？
选择硼的主要原因是要提高铝的纯度很难。



而且，在制造过程中硼材料更容易被处理。

因为硼的最外层电子比Si少一个，所以就会有一个空穴！



这个是导电的关键吗？

并且，

这是把硼作为杂质混入硅中。



入门书中也经常这样写“附近的硅原子中的电子会进入空穴中，并且空穴附近的……”

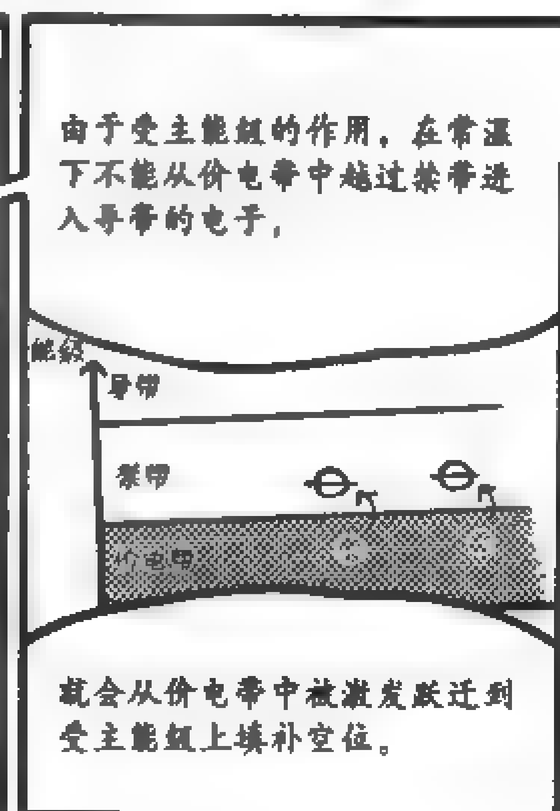
附近的硅原子中价电子会移动去装填空穴，这样就能够发生电子传导。


我感觉好像没有电子信号的传输速度感。
嗯！


掺入了13（Ⅲ）族杂质的Si晶体也像N型半导体一样是立体结构的，让我们来分析一下它的电子轨道的能量状态吧！
B


在形成晶体时，即使在Si中掺入少许B，电子轨道本身也不会发生很大的变化。
但是，因为Si和B的原子核中的质子数不同，所以在其周围会形成一个不同的电子能量状态。
B


我们将在靠近价电带顶附近形成的能量状态叫做“受主能级”。
导带
禁带
价电带


由于受主能级的作用，在常温下不能从价电带中越过禁带进入导带的电子，
能级
导带
禁带
价电带
就会从价电带中被激发跃迁到受主能级上填补空位。

被激发跃迁的电子所到达的地方因为没有电子，所以就像带正电荷的穴一样，
禁带
我们将这个穴叫做“空穴（正孔）”。
价电带
空穴！
空穴（正孔）

这个空穴带有与电子相反的正电荷，具有与电子相似的行为。
作为粒子的性质
作为波的性质
那就是共同拥有作为粒子的性质和作为波的性质。



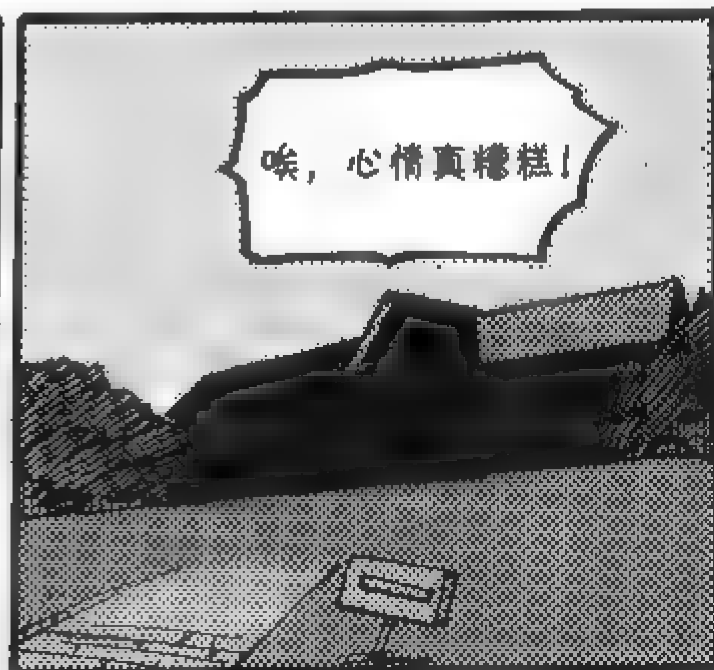



啪
讲完了！


喂，
少爷！
……


为什么妈妈痛苦的时候，
爸爸却不在我们身边？
据说是在工作！


……

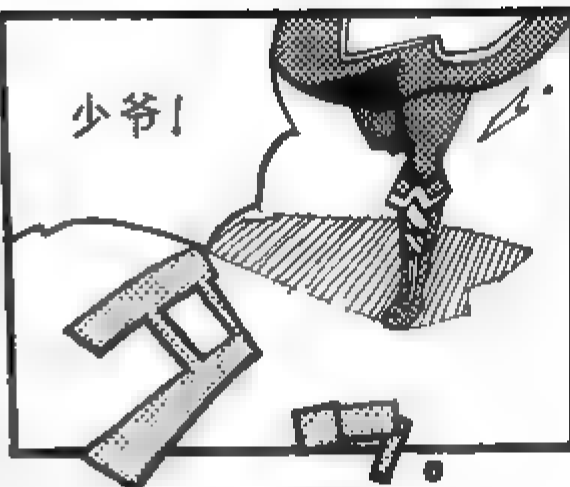

唉，心情真糟糕！

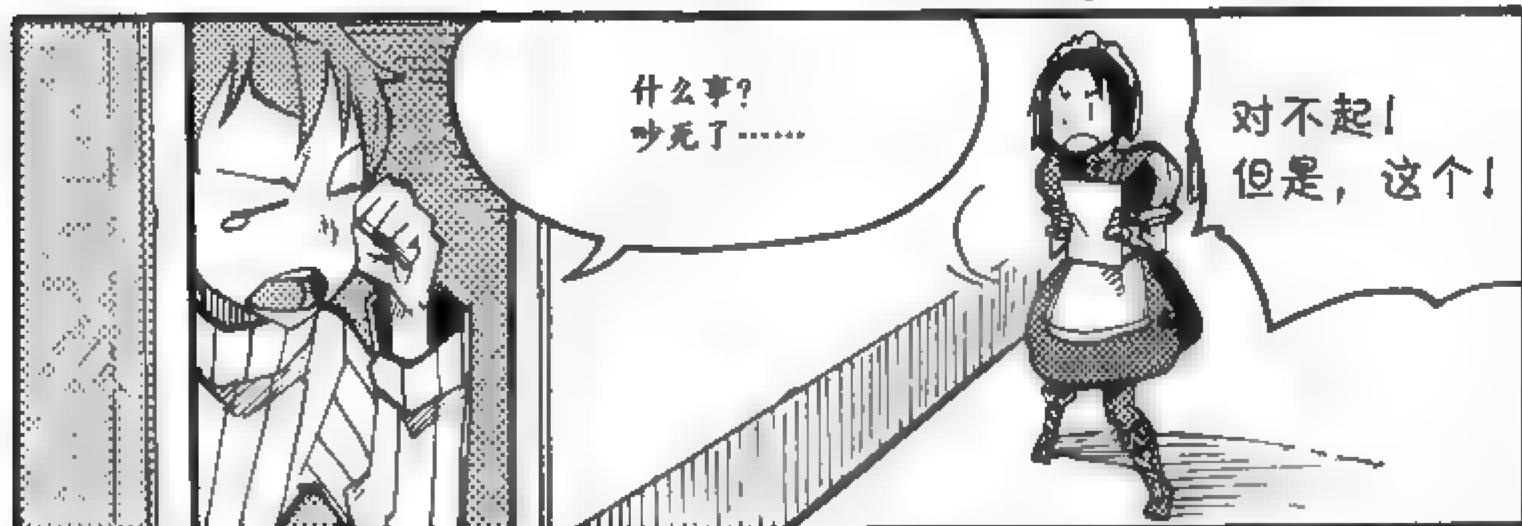
第 6 章

杂质半导体的应用以及二极管和晶体管

1 硅二极管




少爷!


什么事?
吵死了……
对不起!
但是，这个!


怎么办呢?
老爷留下的……
我要离开一段时间。
爸爸


啊?
哇?

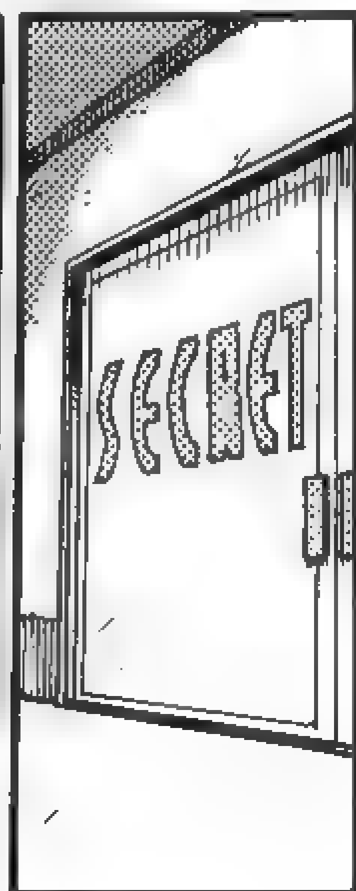

一点都不在乎我的感受！这个家伙！
啊?


连妈妈死的时候，他都只顾着工作没有回来……
或许工作对他来说是最重要的吧！

不，不要那样说……
唉！

我都说了，就是那样的！

喂，我们继续学习吧！

……
爸爸

SECRET



什么是N型半导体？

是在本征半导体中掺入了15族（Ⅴ族）原子杂质的半导体！

P型半导体呢？

是在本征半导体中掺入了13族（Ⅲ族）原子杂质，并由产生的空穴负责导电的杂质半导体！

Si P Si Si B Si









并且在从收音机之类东西的播放电波中获取声音信号时也会用到半导体器件。

在那种地方也会用到啊！

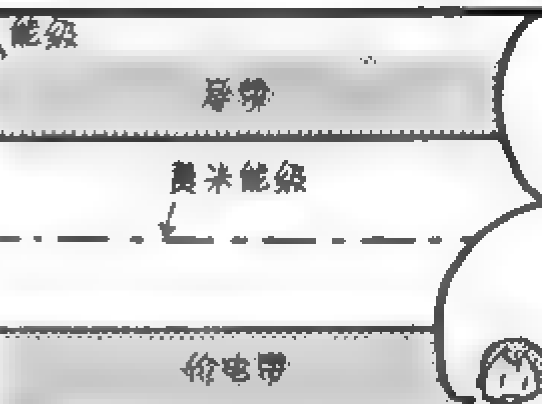


那么，让我们使用费米能级来考虑一下把P型半导体和N型半导体接合在一起时的能级

咔

费米能级?

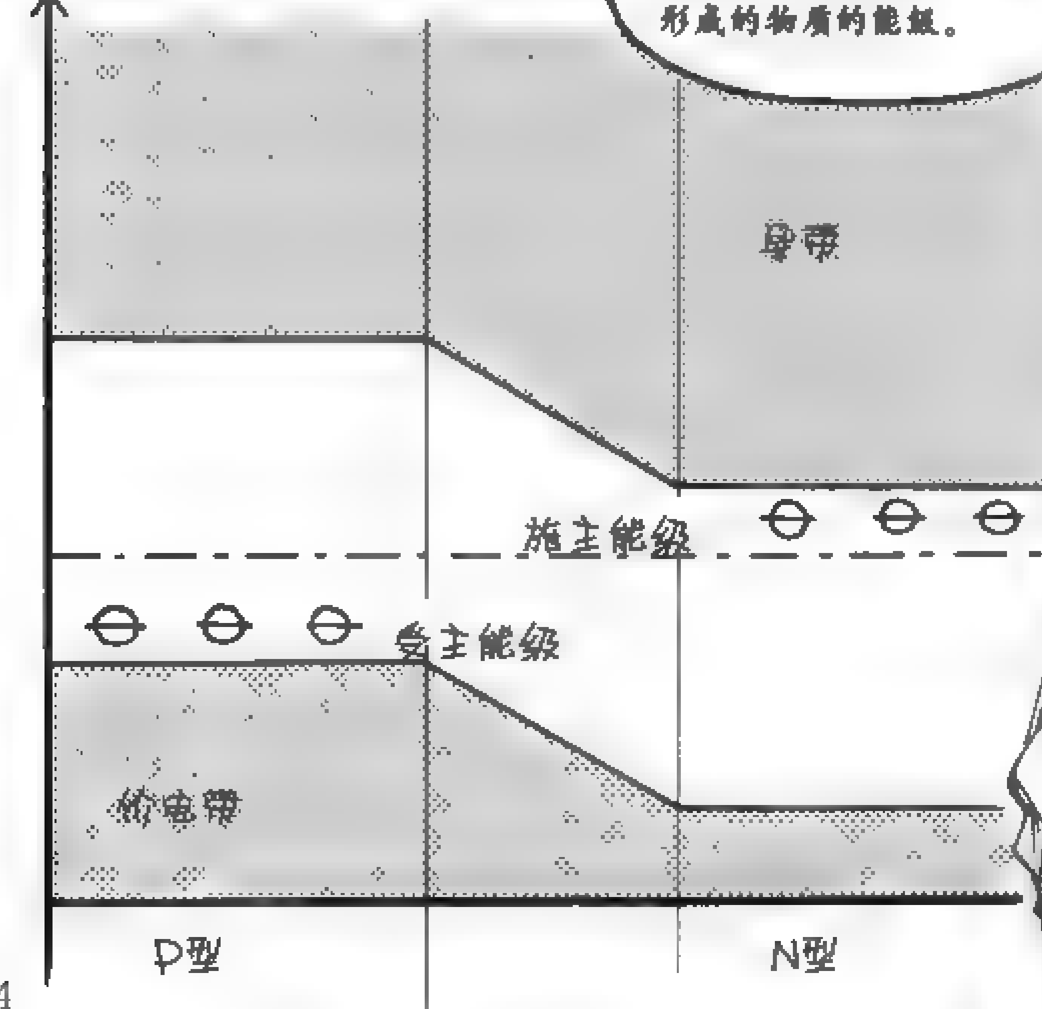
所谓费米能级，



是指在考虑某种物质（晶体）中的电子占据几率时，

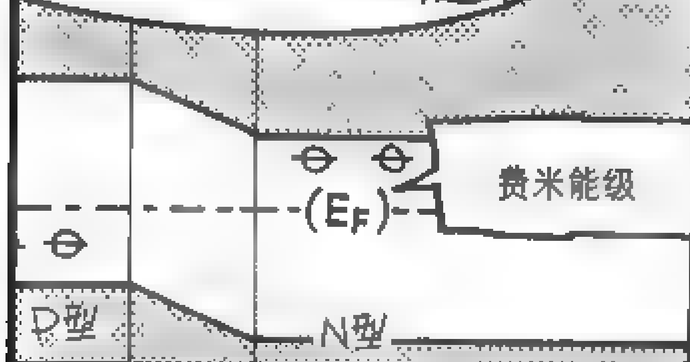
相当于被电子占据的几率为1/2的能级。

并且，这是P型半导体和N型半导体接合在一起所形成的物质的能级。

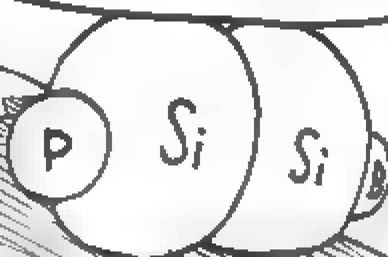


为什么把它们的费米能级写在同一高度的能级位置?





在不向P型半导体和N型半导体施加外电场时，它们会以相同的温度连接在一起（处于热平衡状态）。

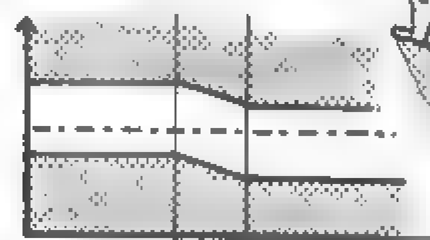


热平衡状态

然后呢?

也就是说因为是热平衡状态，所以电子存在的几率也必须一致，对吗?

这就是费米能级必须一致的理由。

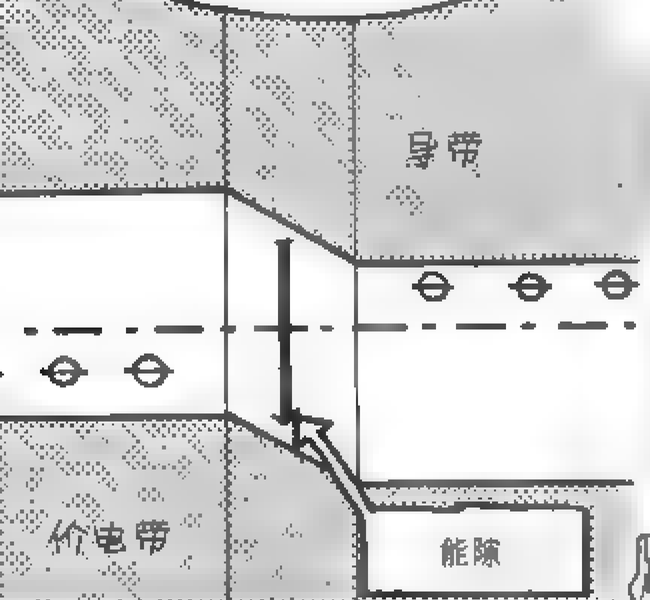


没错!

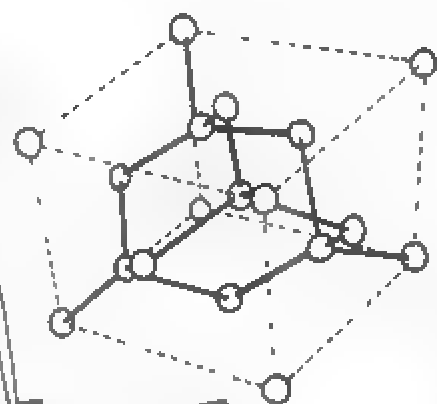




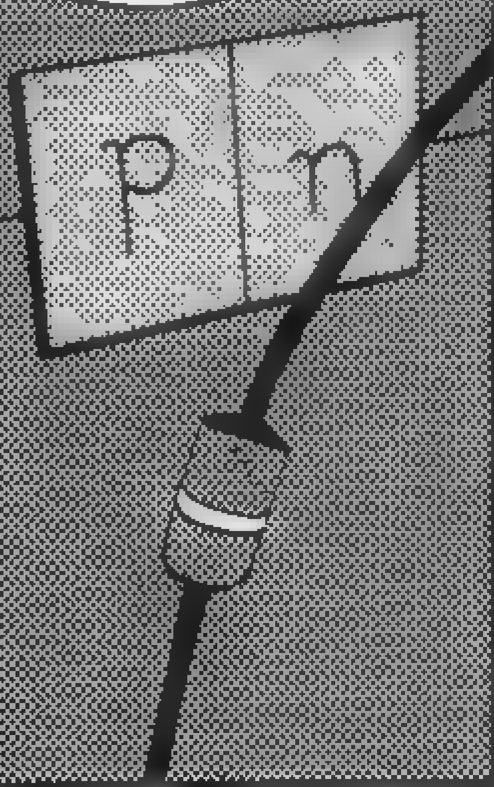
关于价电带和导带之间的能隙（energy gap）。



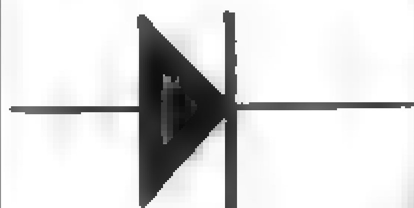
因为它们的基本结构都是单晶体Si的结构（钻石结构），所以它们的能隙相同。



这样，我们将P型半导体和N型半导体结合在一起所形成的整流元件叫做“P-N结二极管”。



同时，二极管的电子信号是这样的！





这也太简单了吧！

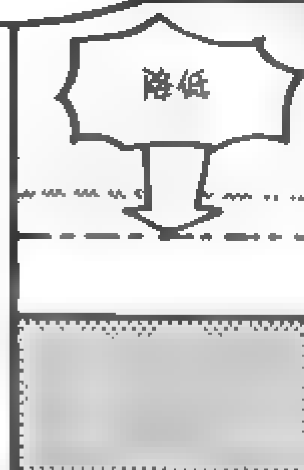
现在让我们把P型端连接在电池的+极，

把N型端连接在电池的−极来看看！



从带负电荷的电子角度来看，如果施加正向电压，电子能量就会降低。

因此，在这种情况下，与−极侧的N型半导体相比较，+极侧的P型半导体的费米能级会降低！



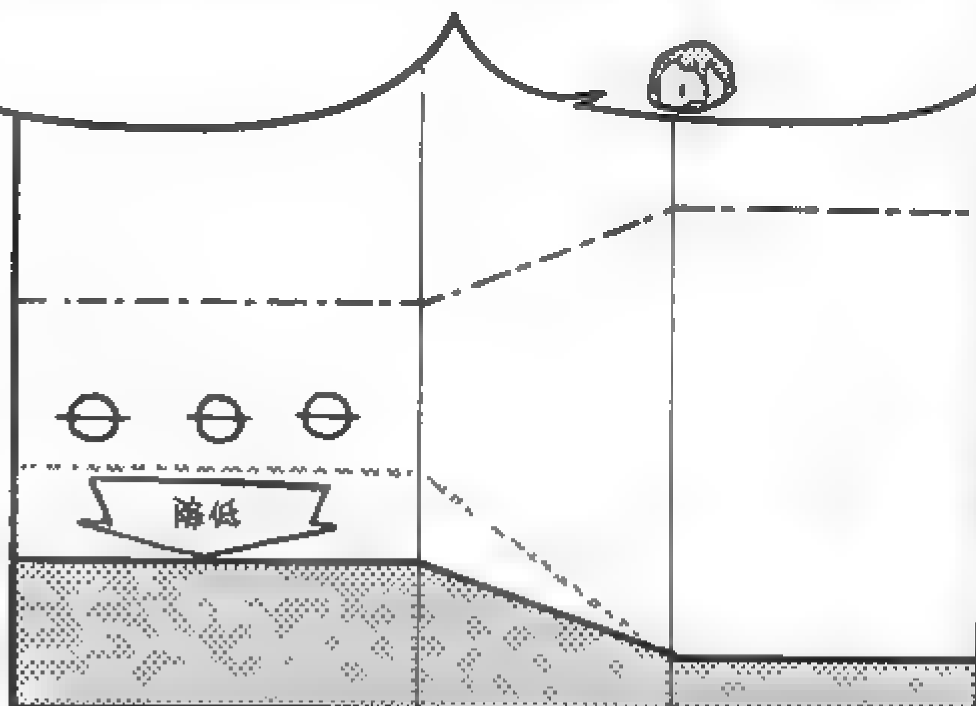
P型

N型

降低了！

并且，N型半导体的价电带能级同样也会降低，

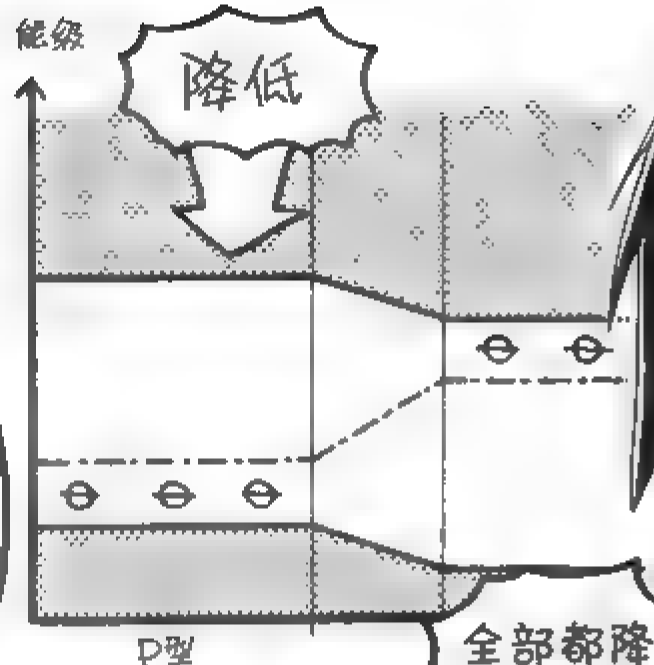
这样，费米能级向P型半导体的价电带能级靠近！



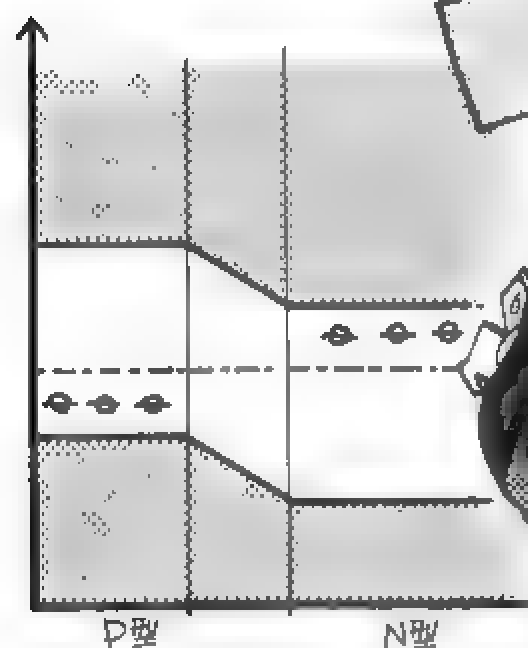
啊，难道P型半导体的导带能级同时也会降低？



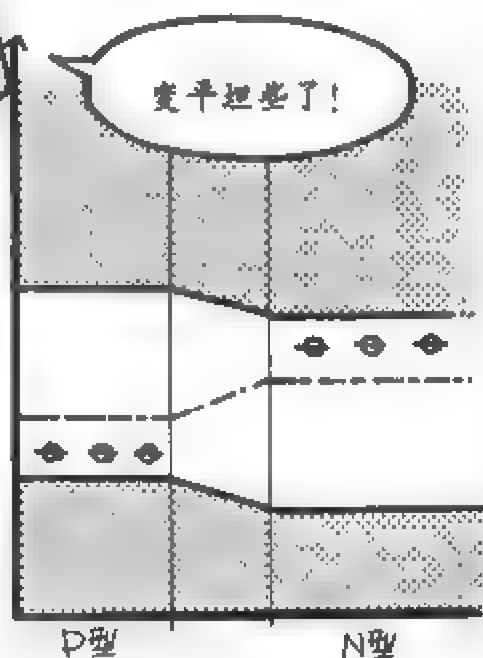
P型半导体的导带能级也和费米能级、价电带能级一样会降低！


能级
降低
P型
全部都降低了！

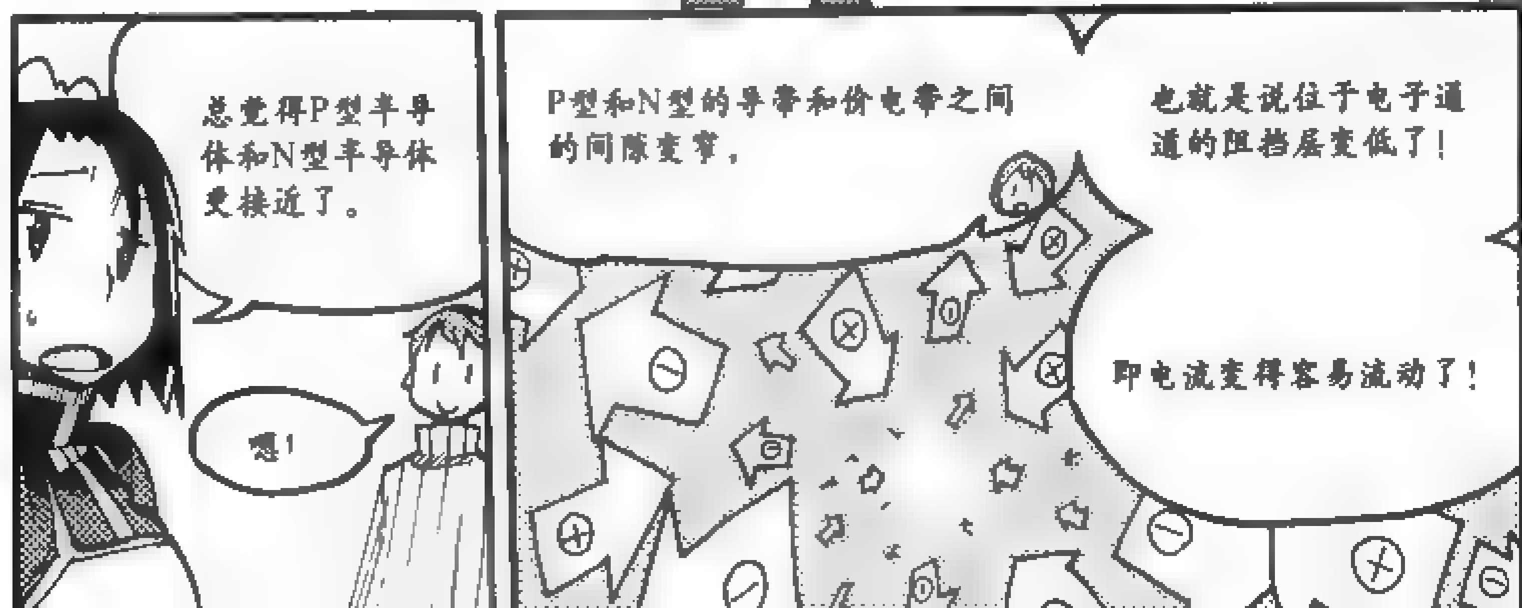
这是给P型半导体施加正向电压前的状态。

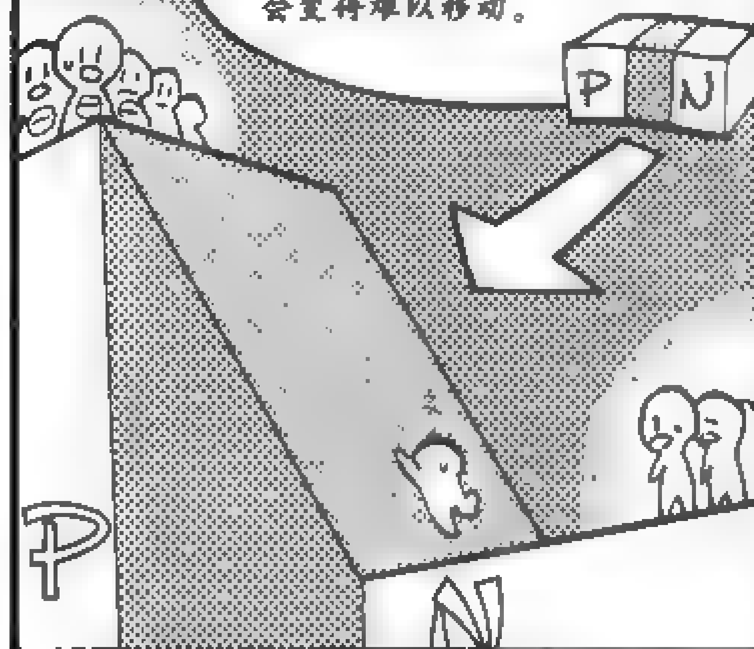

P型
N型

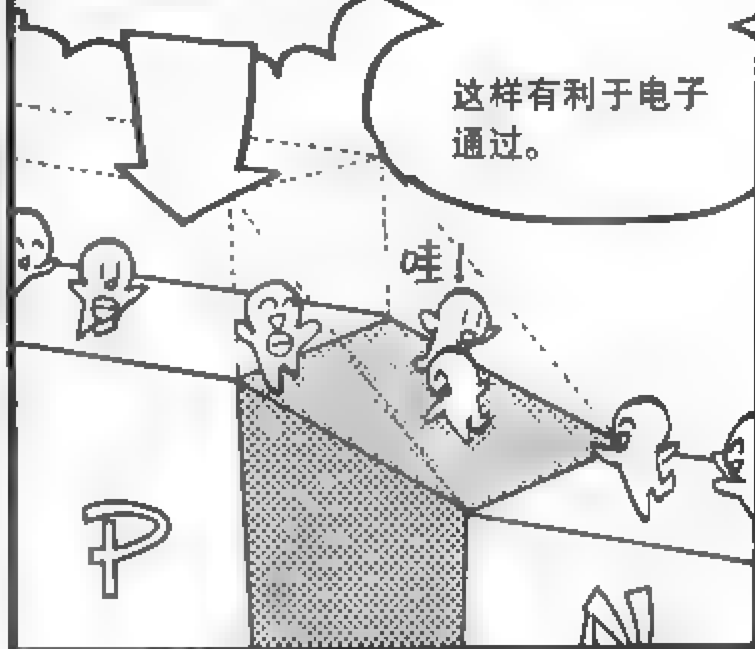
这是给P型半导体施加了正向电压的状态。


变平坦些了！
P型
N型

总觉得P型半导体和N型半导体更接近了。
嗯！
P型和N型的导带和价电带之间的间隙变窄。
也就是说位于电子通道的阻挡层变低了！


即电流变得容易流动了！


这里的阻挡层是指P型半导体和N型半导体之间的接合部分，也可以将其看作一个斜坡。
如果P型半导体和N型半导体的导带的能级差变大的话，那个斜坡也会变陡，电子就会变得难以移动。
P
N
P
N


降低！
但是，如果给P型半导体施加正向电压，P型半导体的导带的能级就会降低……那个阻挡层（斜坡）就会变低，
这样有利于电子通过。
哇！
P
N


下面让我们来看一下空穴（电洞）。
因为空穴带有与电子电荷相反的正电荷，所以如图所示，越往下其能量越高。
能级
低！
高
空穴
P型
N型

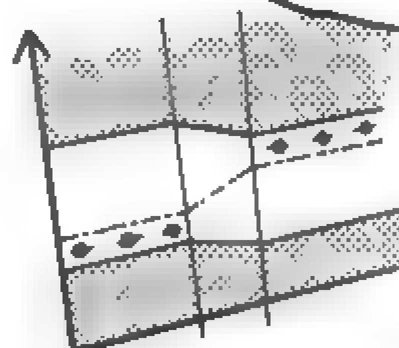

很多人一直认为载运电流的粒子（载流子）是电子，其实电子只是N型半导体中的载流子。
那么，P型半导体呢？

在P型半导体中，价电带中的空穴（可以将它看作带正电荷的粒子）会成为载运电流的粒子！

P型和N型半导体就好像处于上下交替的关系。

这与正电荷和负电荷是相反的类似，

因此，我们要将它们反过来考虑一下。



也就是说，空穴也是由P型向N型漂移！

如果阻挡层变低，电子和空穴就都可以穿越阻挡层定向移动。

能级

啦啦啦

导带

阻挡层

它们可真快乐啊！

阻挡层

P型

哇！

价电带

因为电子和空穴的移动，二极管中就会产生电流。

$I=I_0(e^{aV}-1)$

（如果施加反向电压）

$V\to-\infty$，

$I\to-I_0$，为饱和状态

……

从量子力学的角度来考察的话，可以用这样的式子来表示电流对电压的依赖性，它们的关系式为指数函数。

好了，知道这个结果就够了！

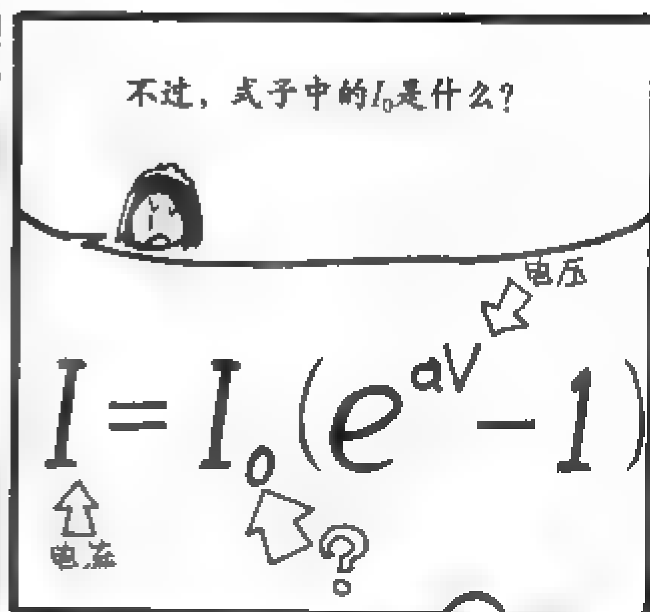
关于其详细内容，看一下更高级的有关半导体特性的书籍你就明白了！

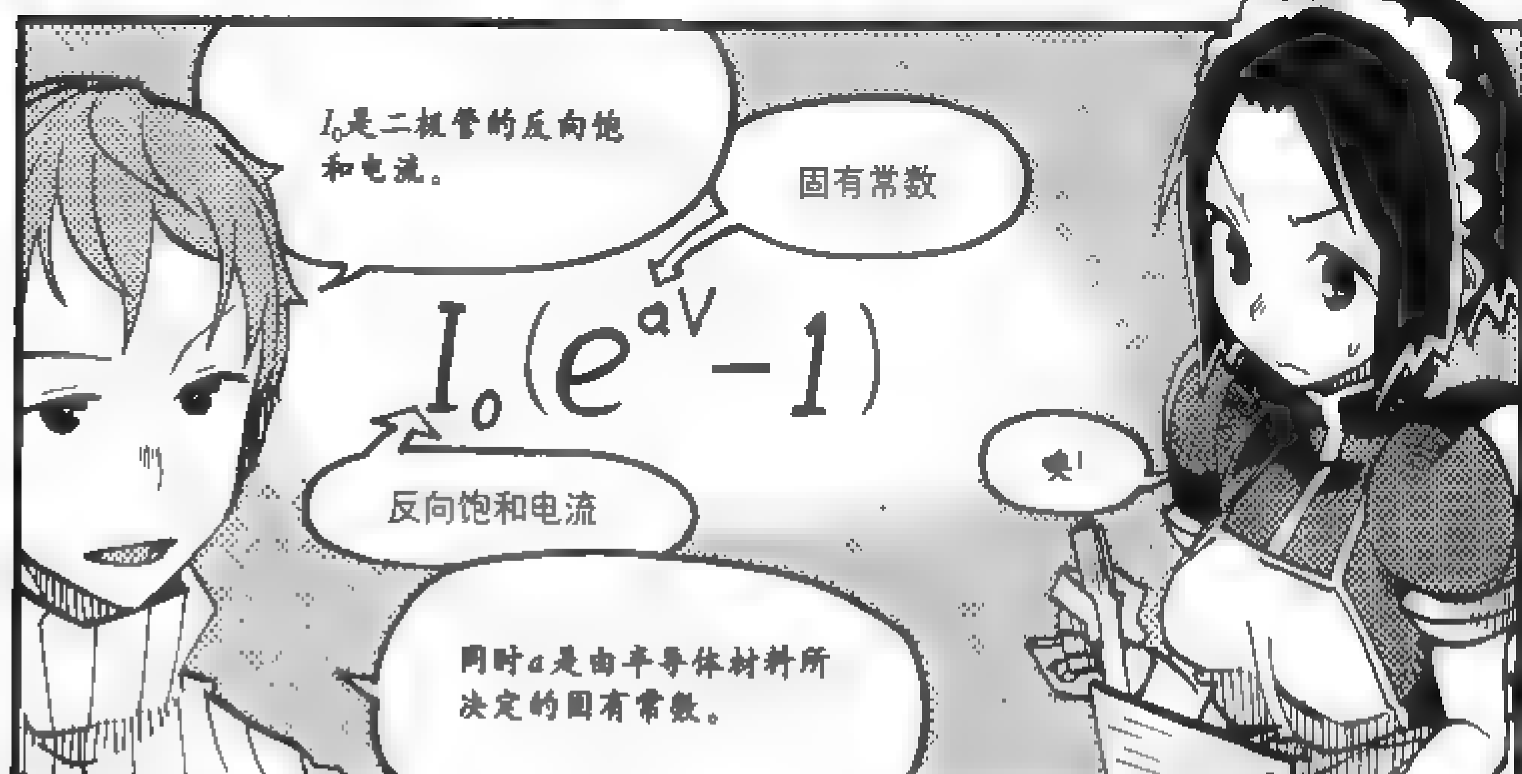
后面还有很多内容吧？

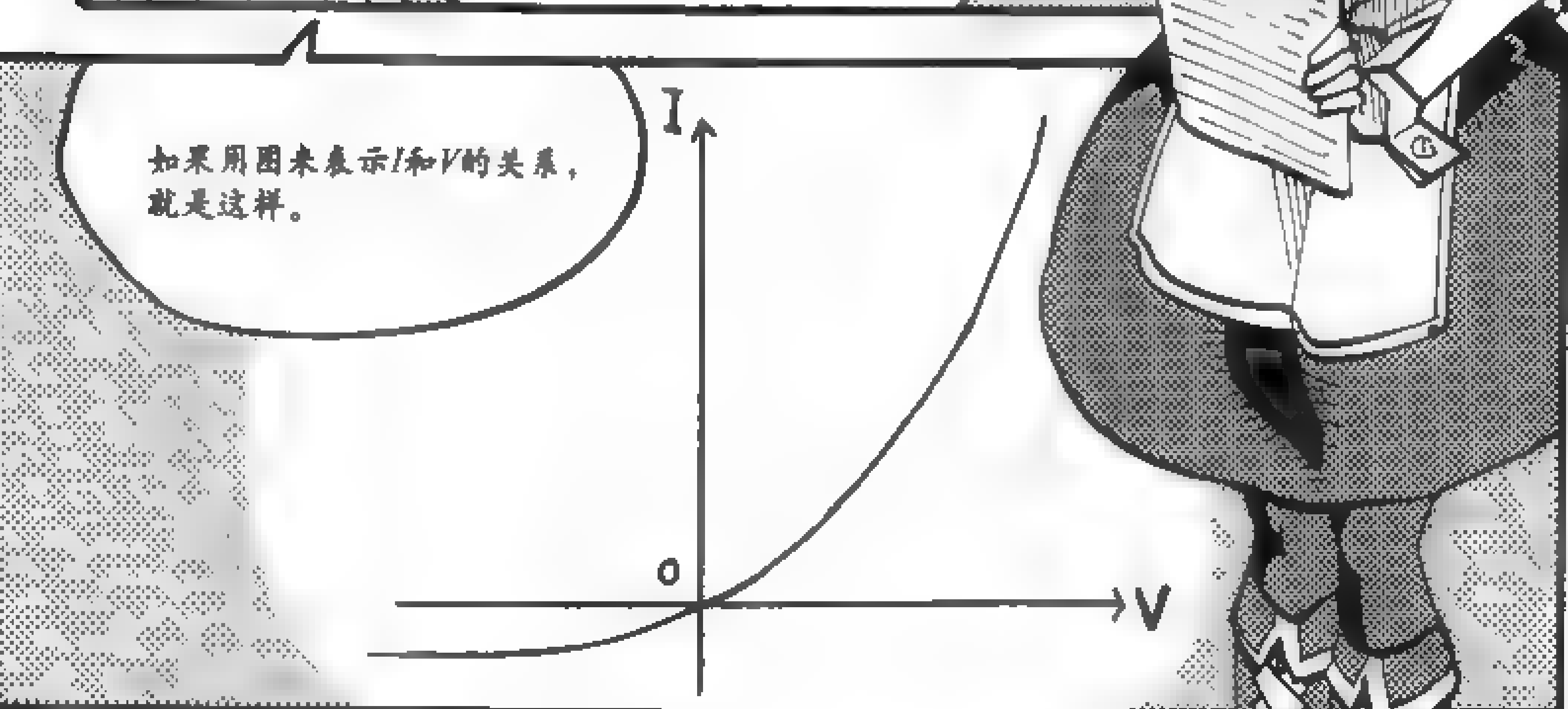
郁闷

……


我这次就要挑战一下！
好吧！


不过，式子中的I_0是什么？
电压
$I = I_0(e^{aV} - 1)$
电流


I_0是二极管的反向饱和电流。
固有常数
$I_0(e^{aV} - 1)$
反向饱和电流
嗯！
同时a是由半导体材料所决定的固有常数。


如果用图来表示I和V的关系，就是这样。
I
o
V

入门书会从二极管的正向（电流容易流动的方向）特性用正向压降（V_f）来加以说明。

正向压降？

半导体入门

根据书中的说明，从二极管所具有的正向电压、电流（$V-I$）特性来看电流增大的部分，

以能将$I=I_0$（$e^{\alpha V}-1$）这一式子所对应的曲线看成直线的点为切点作出这条曲线的切线，

将那条切线和（V）轴的交点看作“正向压降”。

$I=I_0(e^{\alpha V}-1)$

I

O

V

就是这个点！

但是，刚才所示的表示V-I特性的曲线永远都不可能成为直线！

也就是说，如果作切线的切点不一样，V_f就会不同。

真的不同！

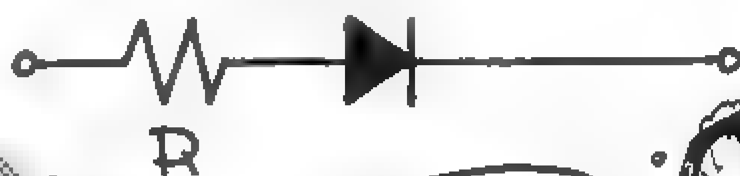
一般在硅PN结二极管中的V_f值为0.6～0.68V。

但是，这个V-I特性是理想二极管的特性，

如果从实际出发来考虑，在二极管PN结以外的部分几乎都含有电阻成分，所以最好这样等价性地考虑！

理想

理想二极管



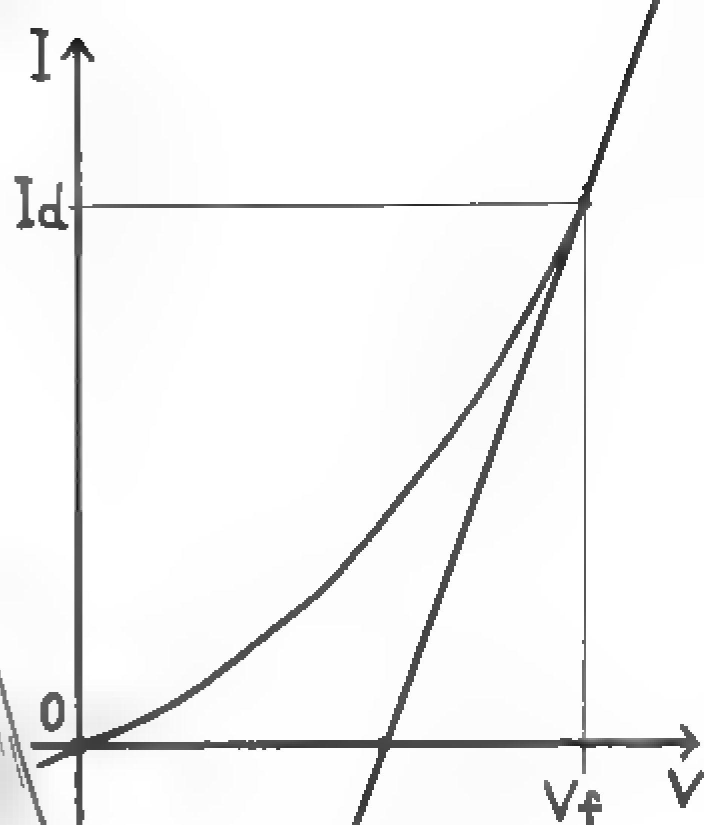
好混乱啊！

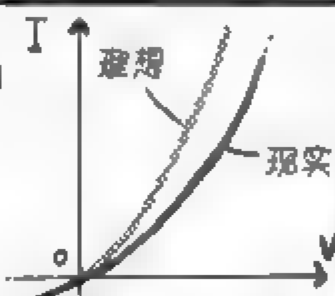
现实

P区的电阻部分

N区的电阻部分




如果考虑电阻成分，V-I特性就是这样！
在电子电路的设计中，将二极管导通时的正向压降看作V_f。
I
Id
0
Vf
V


电流比理想状态下要小吗？
I
理想
现实
0
V


在理想二极管中，电压与电流的关系可以用指数函数来表示，
但是在现实状态下，因为二极管的绝大部分都含有电阻成分，所以电流会受到限制。
I
V


电流受到限制后，在电流大的区域，可以如图那样表示电流和电压的关系，
有些区域的电流和电压的关系可以用直线来表示。
理想
电阻
现实
不过，

从直线区域作切线求V_f的值并不太重要，

因为最重要的就是V-I特性本身。

即使用那个值去讨论二极管作为电子器件的特性也没有什么意义。

原来如此！

2 晶体管

在二极管之后，接着要讲的是晶体管！晶体管因结构不同可分为两种类型。

● “双极晶体管”

● “FET”
（Field Effect Transistor）
场效应晶体管

● 双极晶体管

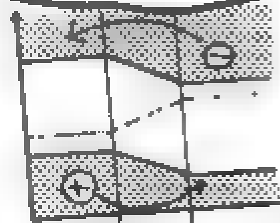
双极晶体管（Bipolar transistor）中的双极（Bipolar）是拉丁语，其语义为两个极性。

双 极
（两个）（极性）

是拉丁语啊！

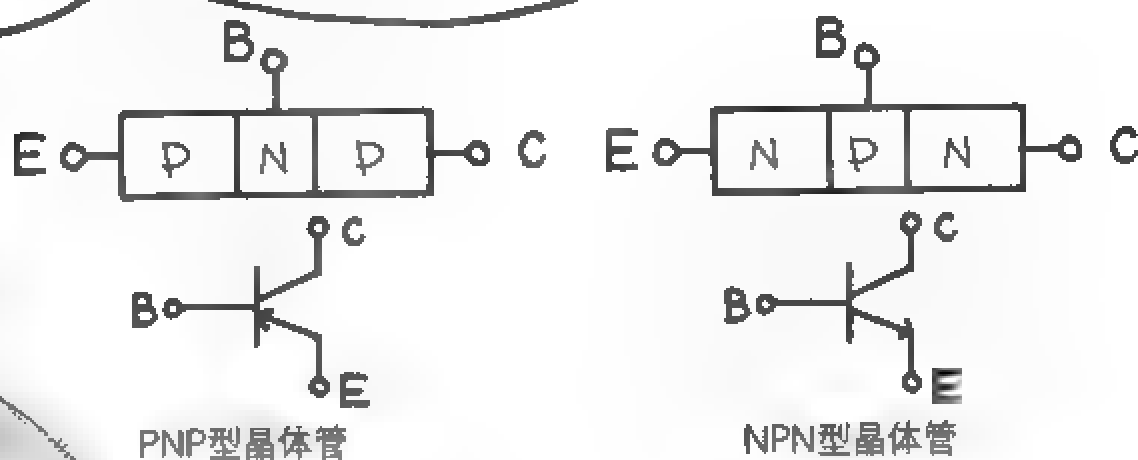
两个极性的构想源于要让N型半导体和P型半导体中各自载运电流的载流子——

电子（负电荷）和空穴（正电荷）使晶体管工作。



那么，我从双极晶体管的基本结构开始说明！

在一个晶体管元件中，有两处含有PN结。



咦？

E?

C?

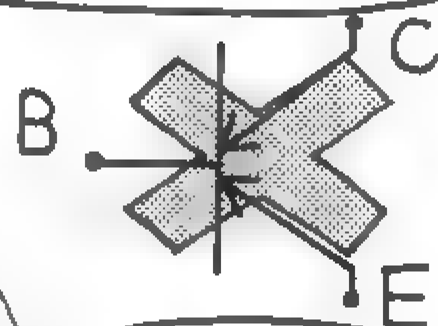
B?



发射极与基极正好构成一个二极管，向着电流流动的方向画一个箭头。

C
B
E

当然，因为在基极与集电极之间也有二极管特性。



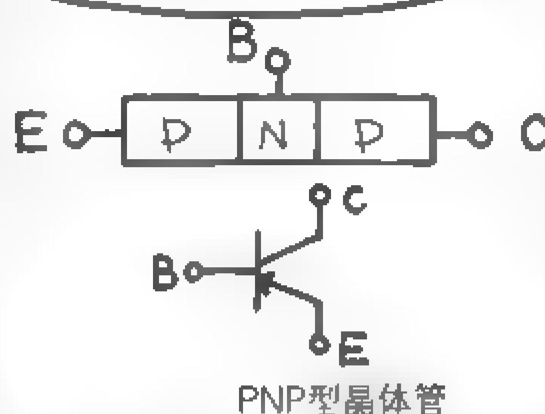
所以，如果以集电极端为起点也画一个箭头，那么上面的图就会上下对称，这样就分不清楚哪个是发射极了。

因此，一般规定只在发射极与基极之间画上箭头。

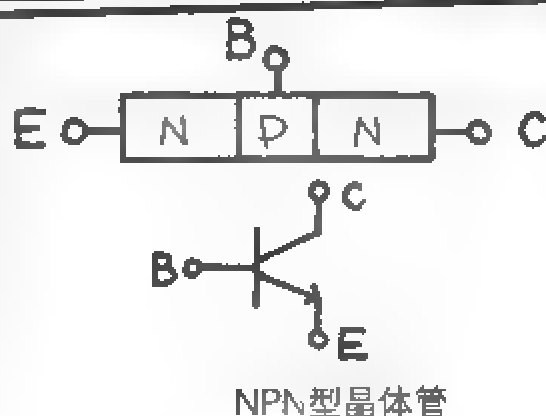
这是一个规则啊！

因为杂质半导体分为N型和P型，

所以将它们组合成晶体管时有以下两种。



PNP型晶体管



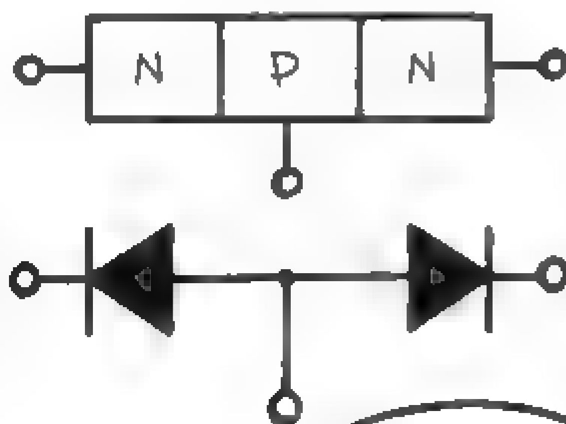
NPN型晶体管

如果把两个二极管对着放在一起，结果会如何？



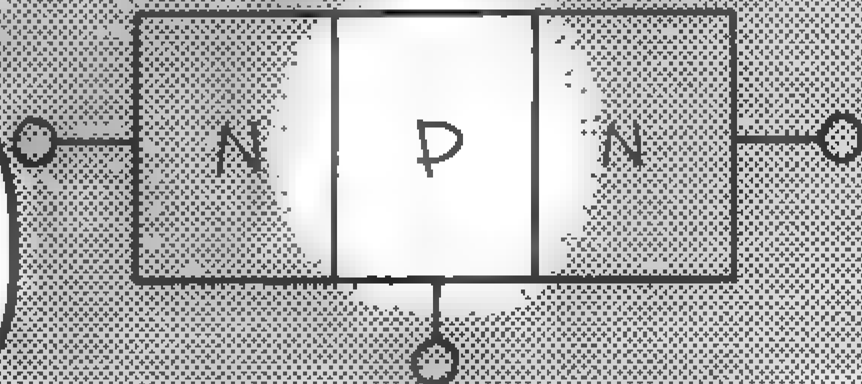
不对！

是这样的。



原来是这样啊！
会有晶体管的性质吗？

如果要问这个与晶体管有什么不同，



那就是夹在两端N型半导体之间的P型半导体的厚度不一样。

如果只看一个PN结，晶体管也和二极管无异！

但是，当两个结变成1微米级时！
这与单纯地把两个二极管对着放在一起组合的东西完全不一样，它会有完全不同的反应！！

会爆炸吗？

砰 砰

这么危险，还能用吗？

I_B I_C

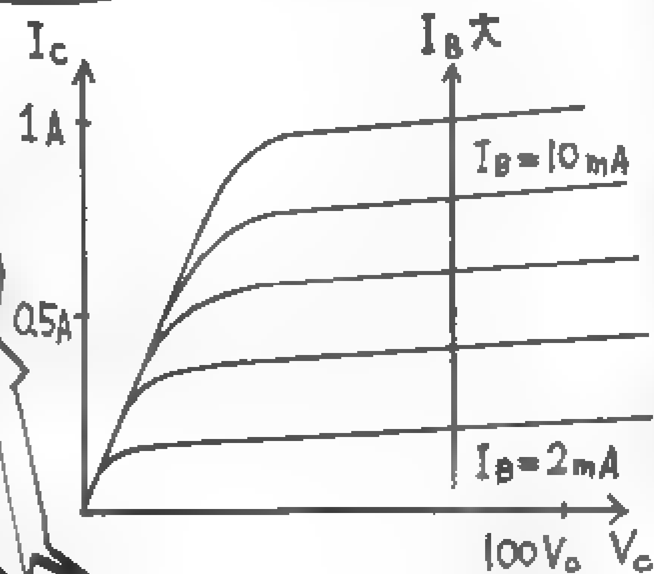
像这样将晶体管连接到电源上。

如果让从基极流向发射极的电流一点一点地逐渐增加的话，会怎么样呢？

电流

就会变成下图这样！

这个图表示的就是晶体管的静态特性！



这个很令人吃惊吧？

简直……
太令人吃惊了！

嗯？



这个图表明如果在一定范围内将集电极的电压放大，集电极电流基本上固定！

大约是基极电流100倍的电流正流向集电极！

B×100 ⇨ C

啊，100倍？太吓人了！



另外，

集电极电流与基极电流的比值被称为“直流电流放大系数”。

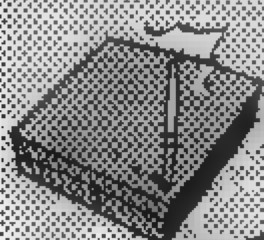
表示符号

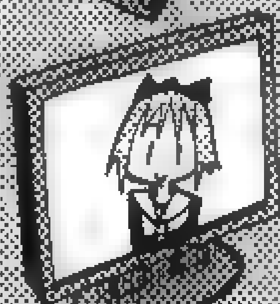
h_{FE}

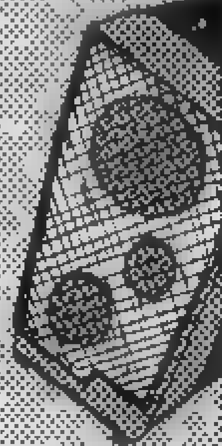
传来了大量的电流，太好了……



正因为晶体管具有这种性质，所以它被广泛地应用到音响装置、影像装置、无线装置、各种机器人等装置中去。

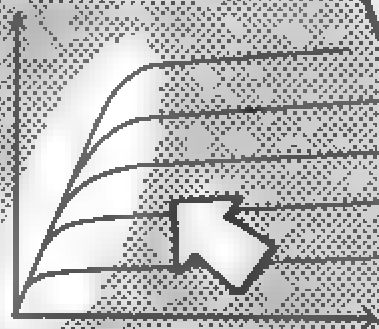






看一下晶体管的静态特性图，当基极电流被固定在某个值时，

在以发射极电压为基准的集电极电压比较低的状况下，就会像二极管那样，有部分区域的电流会不断增加。

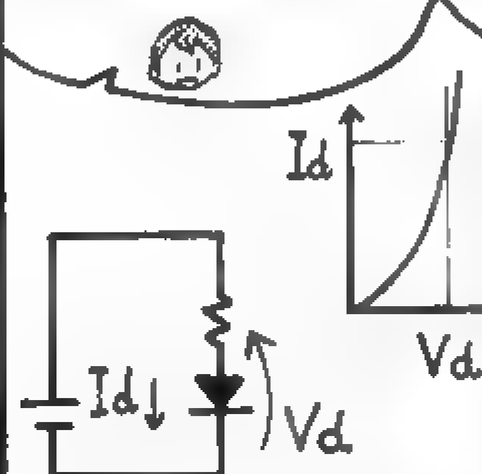


我们将这个区域叫做“饱和区”。



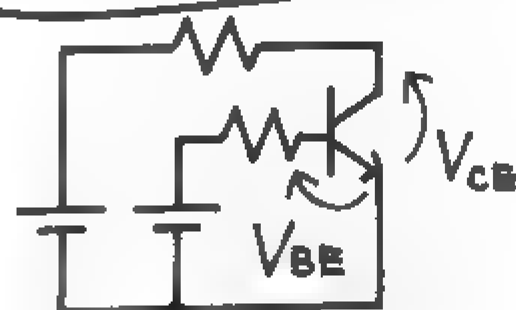
我已经讲过了，在硅接合型二极管的情况下，

二极管的压强大约是……



0.6V。

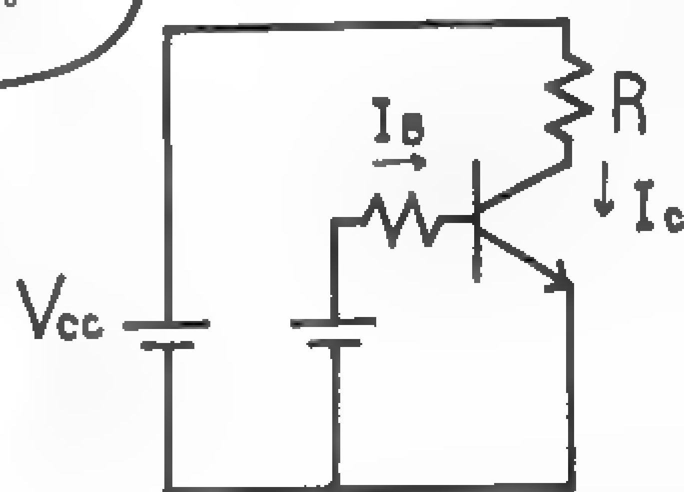
如果给硅晶体管（NPN型）施加偏压，使之变为饱和状态。



那么，
此时V_{BE}与二极管的反应相同，
其值在0.6V左右。

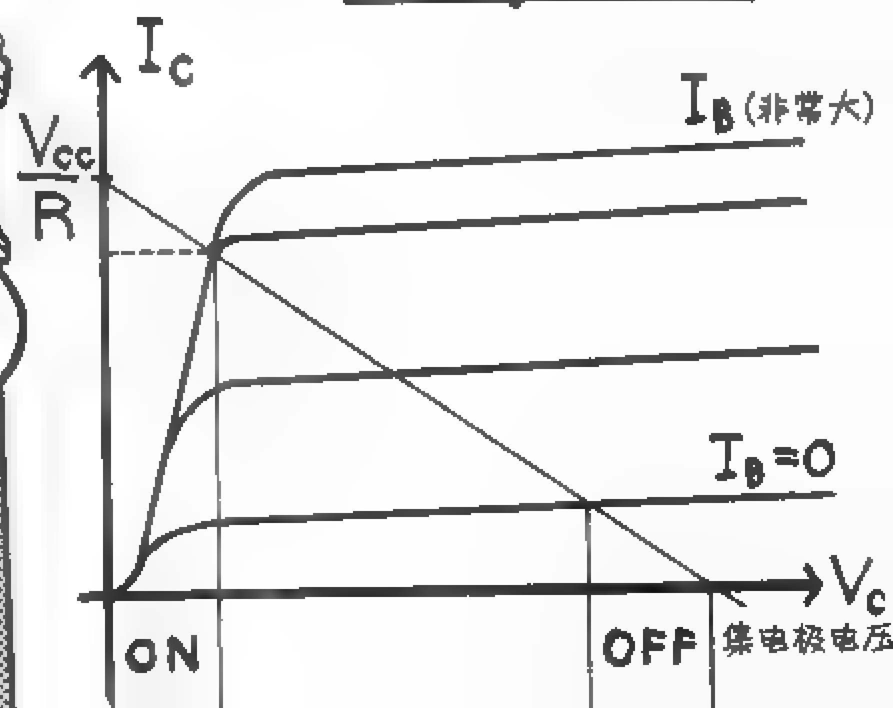
但是，此时相对于发射极而言，集电极电压通常在0.3V以下。

请看这个图。

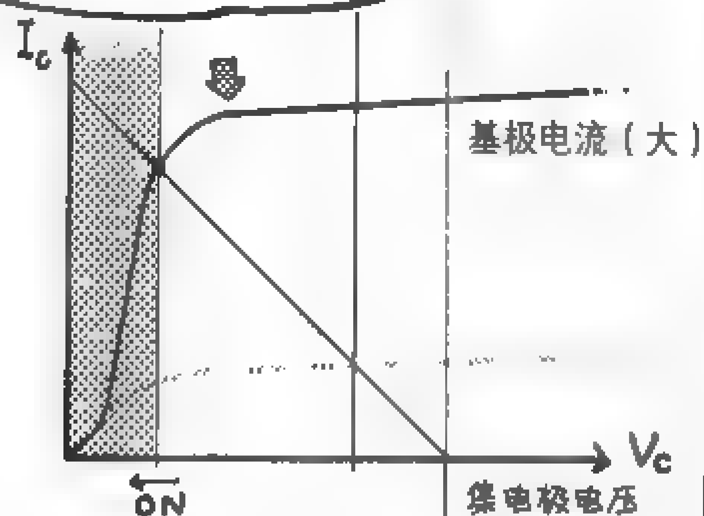


哦！

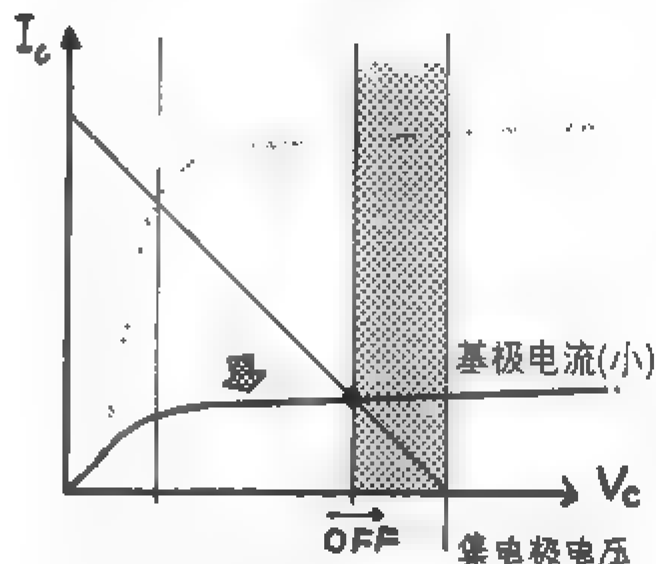
根据晶体管的种类的不同，也有低于0.1V的时候。



利用这个特性，如果让基极电流通过，集电极电压几乎等于发射极电压。



如果不让基极电流通过，集电极电压几乎等于电源电压。



也就是说，用基极电流可以切换晶体管的ON/OFF状态！
这个工作原理是逻辑电路中最基本的知识！

真厉害！

到这里我一直都是以NPN型晶体管为例讲解的，其实PNP型晶体管的工作原理也基本相同，只是要把电源极性（+和−）调换一下。

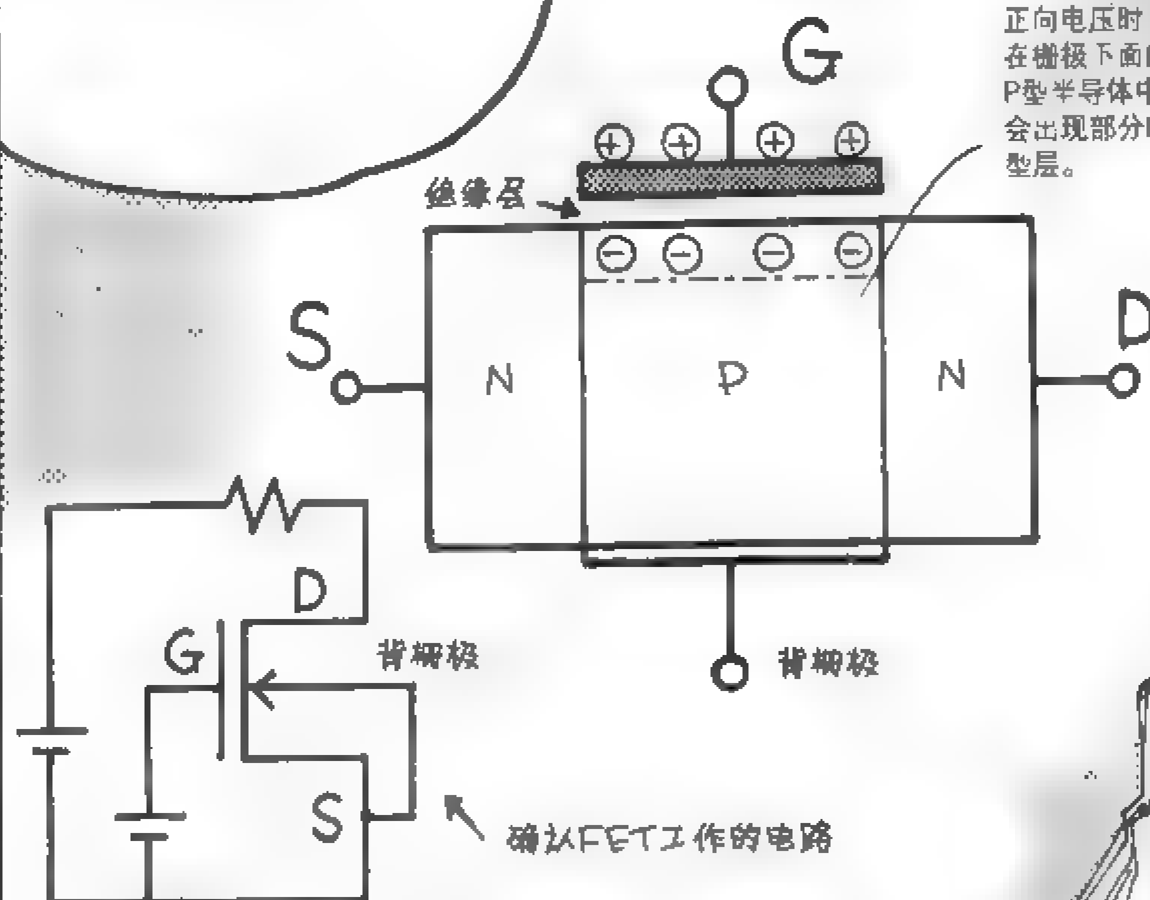
晶体管是一种既可以用来放大电路，又可以用来操作开关的电子器件，这一点你明白了吧？

嗯！

● FET（场效应晶体管）

下面让我们利用P型和N型杂质半导体来表示与双极晶体管结构不同的放大器件！

首先来看看这个结构图。



这儿表示的是MOS型FET，

另外还有一种叫做结型场效应晶体管的FET。

MOS?

Metal是

Metal（金属）

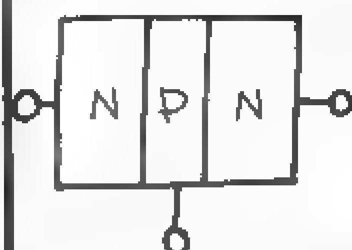
Oxide（氧化物）

Semiconductor（半导体）

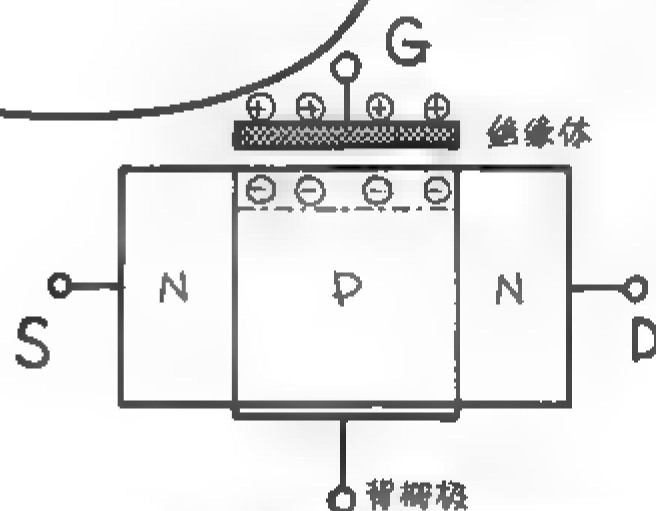
的简称。

看这个图，感觉下面的N-P-N杂质半导体的组合结构与NPN型双极晶体管很相似。

但是，它们有什么不同呢？

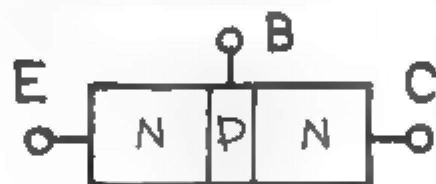


好像将在中间的区域变宽了……

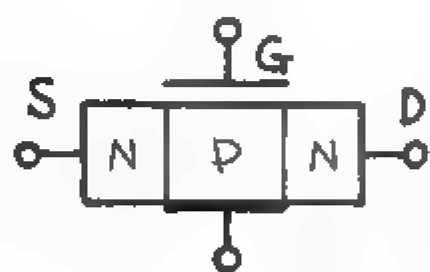


没错！并且在中间的P型半导体部分夹着绝缘层，安装了被称为栅极的电极，这些都是FET的特征！

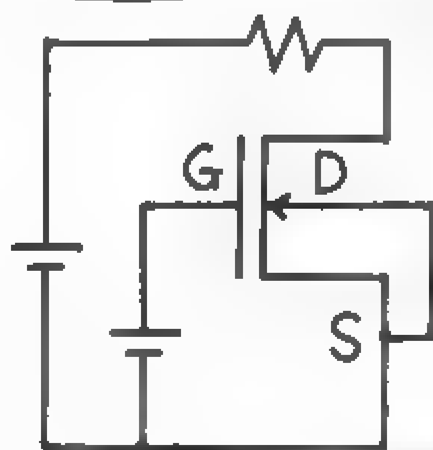
NPN型双极晶体管



MOSFET

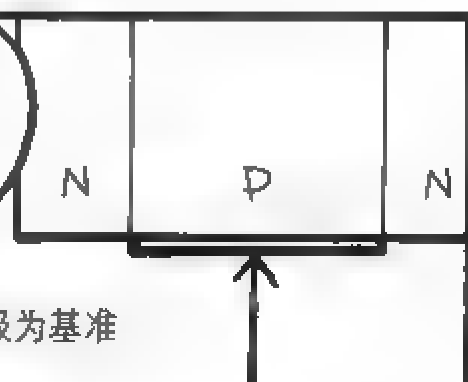


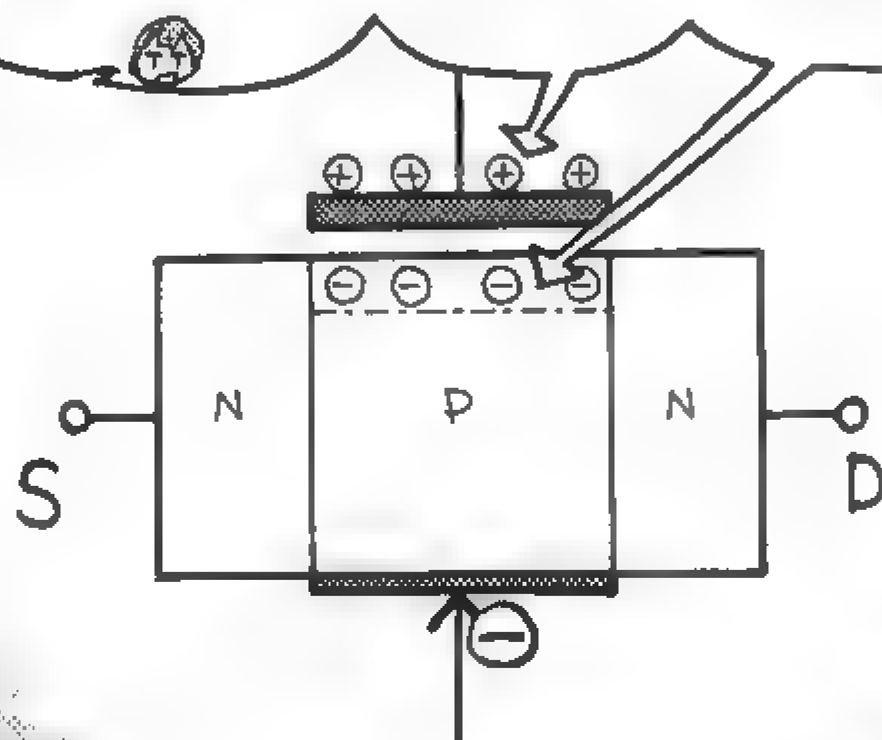
给P型半导体也加上电极（叫做背栅极），使这个电极与栅极之间隔着一层绝缘层。



这是为了制作电容器哦！

如果施加外电压，使与衬底相对的栅极带正电……

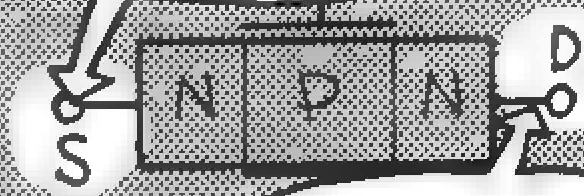



在隔着绝缘层的栅极和P型半导体之间，
金属栅极带正电荷，
在P型半导体端产生负电荷。
N
P
N
S
D

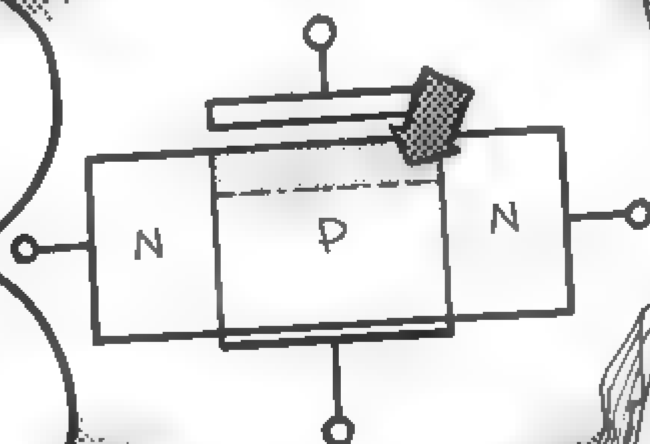

这个三明治结构的晶体管两端的N型半导体具有容易让负电荷通过的性质。

把刚才在P型半导体中产生的负电荷层作为电子通道，给两侧的电极加上电压，晶体管就能够导通了。
N
P
N


这个MOS-FET的结构看起来是左右对称的，对吧？
G
S
D
N
P
N
对！


我们将有两个N型半导体的一端叫做源极（S）。
D
S
N
P
N
将另一端叫做漏极（D）。

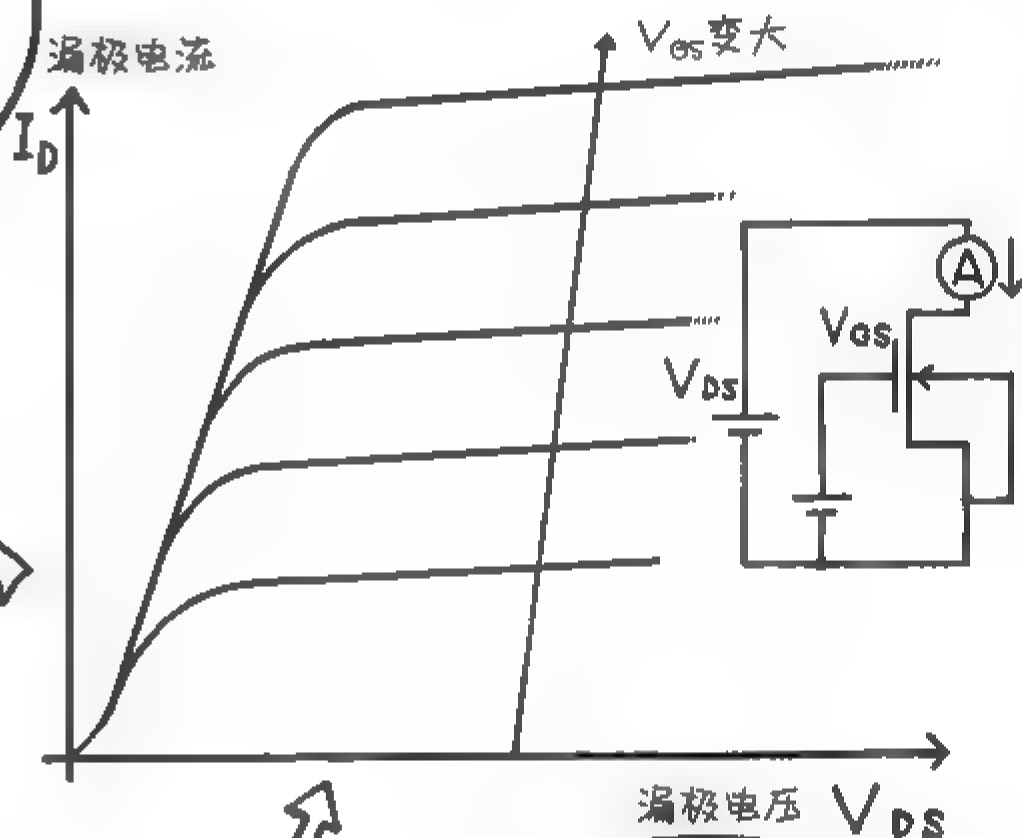
这时，在P型半导体中形成的电子通道被称为“沟道（channel）”。



这种情况下的沟道起着将N型半导体连接起来的作用。

我们将这样的晶体管叫做“N沟道金属氧化物半导体场效应晶体管(N沟道 MOSFET)”。

而且这个图表示了N沟道MOSFET的栅极电压和通过漏极的电流的特性。



这是由漏极流向源极的电流值。

这是以源极为基准测量的漏极电压值。

沟道电流是由栅极电压控制的吧？

没错！

给栅极接上电压后，沟道才会导通……

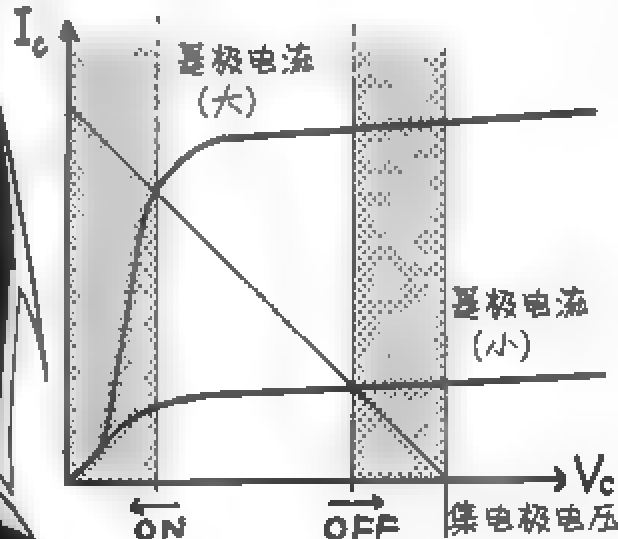
如果将栅极电压变为0，就能够关断沟道电流。

这个操作表明可以通过控制栅极电压把FET当作开关来利用。

嗯？

……

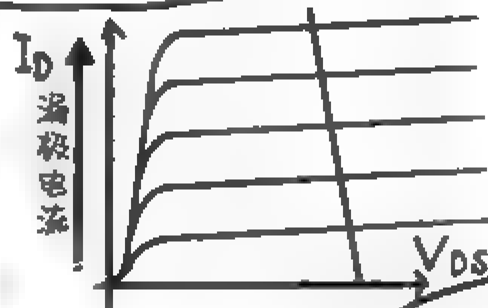
我觉得这个图和这个性质与双极晶体管的性质很相似。



非常相似！

但是，
也有不同之处！

对于双极晶体管来说，如果改变“基极电流”，集电极电流就会发生变化。

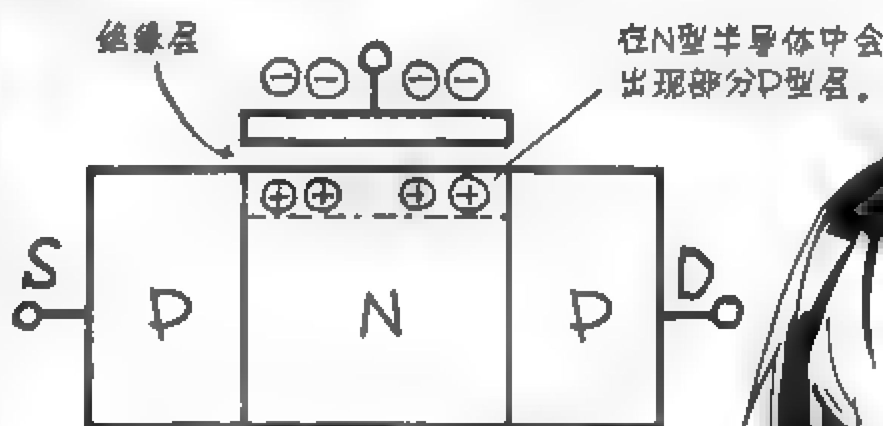


在FET的场合，如果改变“栅极电压”，漏极电流会发生变化。

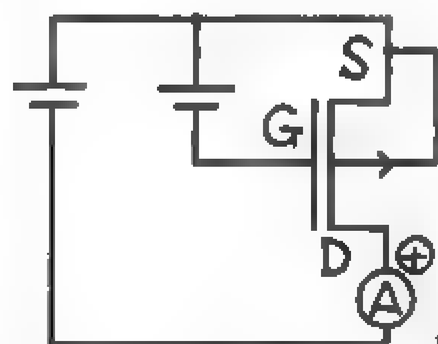
同时，与双极晶体管一样，

如果将P型和N型半导体对调后重新组合，也能制作出MOSFET。

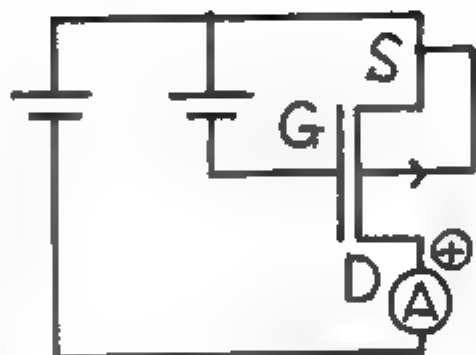
就是这样！



上图是P沟道FET工作电路



正极和负极相反了！


S
G
D
A
我们将这种结构的FET
叫做P沟道FET（P沟道场效应晶体管）！


把N沟道FET和P沟道FET组合在一起后，
就能够制造出用于电脑上的CPU和进行各种逻辑运算处理的器件。
太厉害了！
那么，到这里基础知识就讲完了。
我掌握半导体知识了？
呼……
不，是基础知识。
唉……

礼物的盒子还没有打开吧？
干吗突然提起我父亲？
先不要问这个，现在最重要的是请你和你爸爸和好！
为什么？
我……我其实是企业间谍！
我知道。
你知道？
啊！
不，是我觉得你很可疑！随便就进这个房间！
太过分了！太过分了！
而且因为不太明白，所以希望我教你半导体的相关知识，对吧？
暴露身份了吧？

不过，你是个间谍，为什么会有我父亲的命令？我不明白。

好吧，我告诉你。

我被委托间谍事务后，刚开始去了你父亲的总公司！

半导体到底是什么？

但是，我没有想到在那个人就是半导体厂的经理，他简直瘦得只剩下皮包骨头了……

什么？

好像他因为老婆的死和被儿子小丰记恨，受了很大的打击。

啊？

前几天见他时还挺精神的。

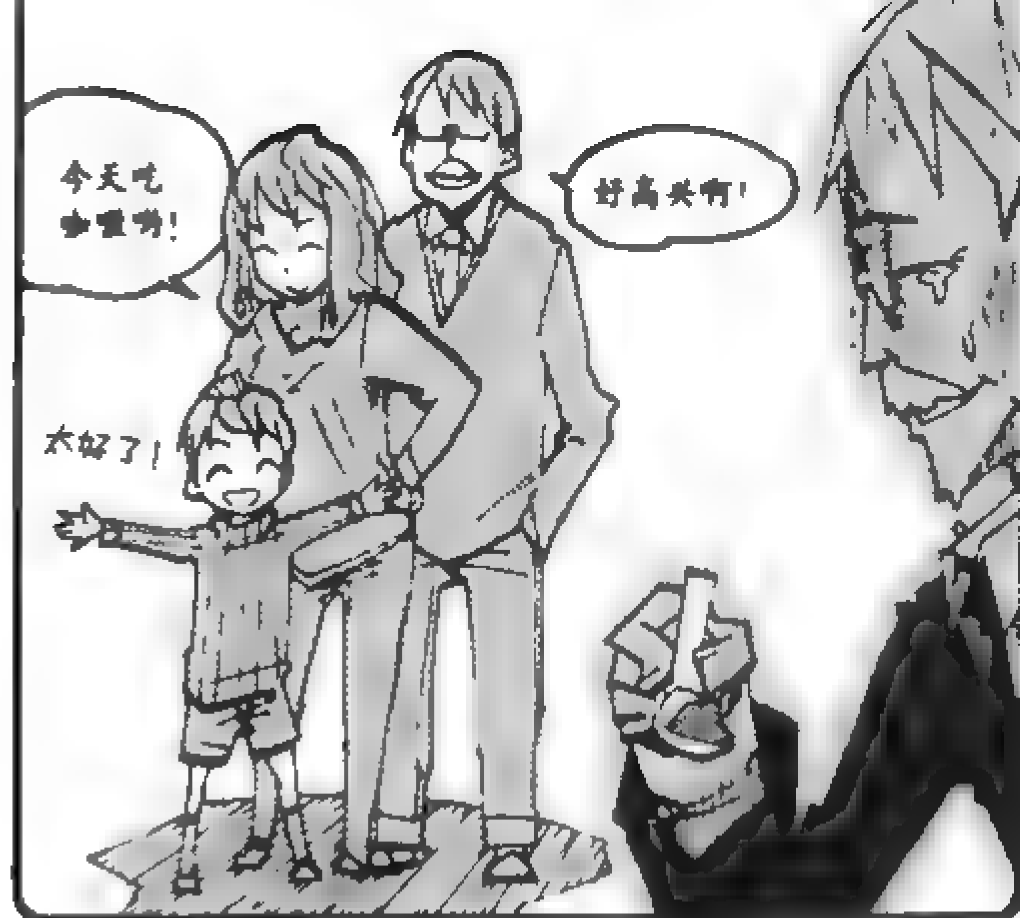
……

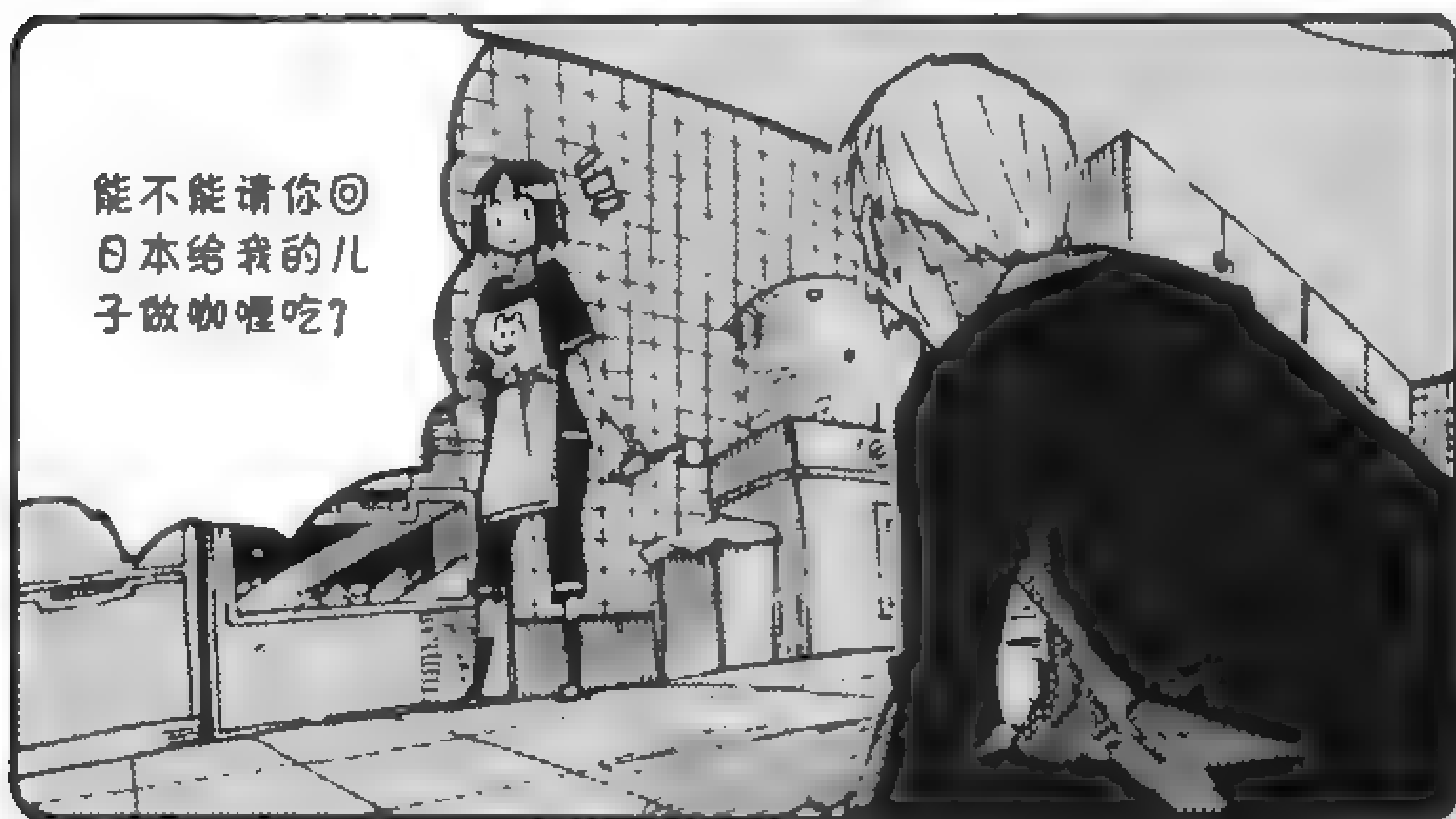
这样可问不出什么东西，所以，我就先让他吃饭了……

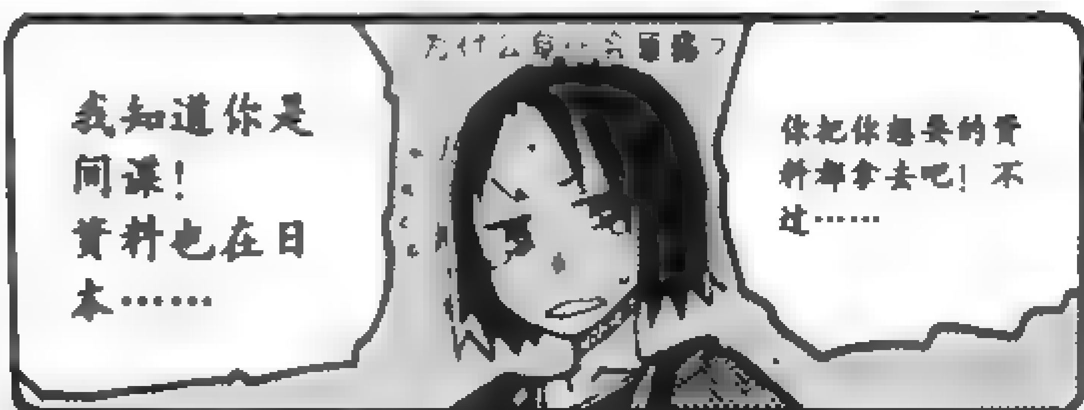
我要咖喱！
我只要咖喱！

嗯……

！！？


今天吃
咖喱哟！
好高兴啊！
太好了！

因为我做的咖喱味道和他老婆做得咖喱味道很相似，所以他每天都要吃，他的身体就慢慢地恢复了健康……
有一天……
……

能不能请你回日本给我的儿子做咖喱吃？

我父亲为了我而跪下来求你？

我知道你是间谍！资料也在日本……
你把你想要的资料都拿去吧！不过……


我的儿子也喜欢咖喱！可是被他讨厌的我却不会做！
如果能够让儿子开心，哪怕是用我全部财产来交换也值得！

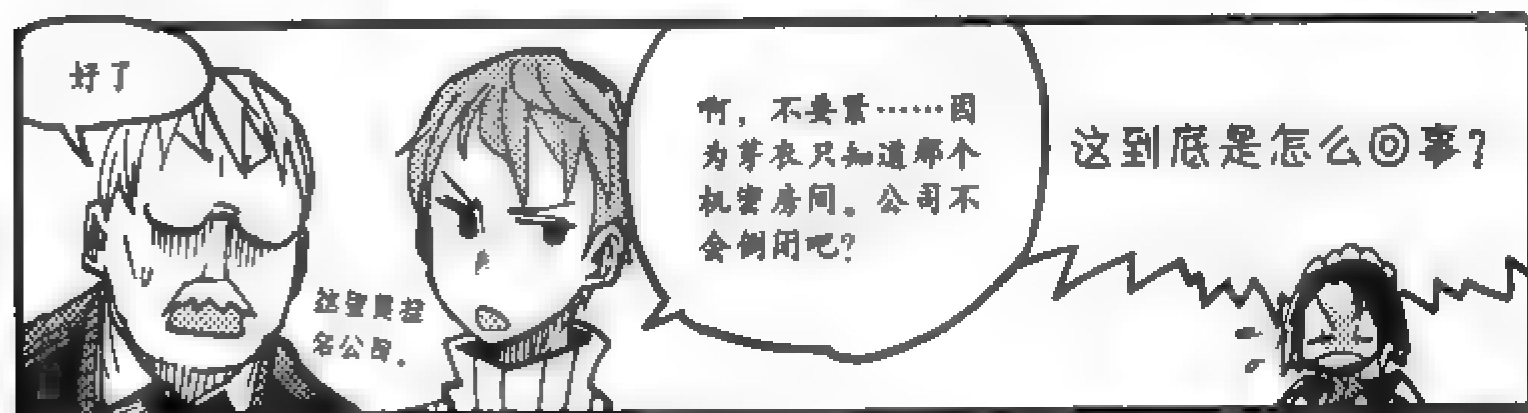

……


就是这样！


太好了！
是吗？
我才没有讨厌他！
他胡说什么啊！
这个老爸！


你怎么在家？
老爸！！
嗯？
我回来难道不好吗？


因为我好像听到了
我儿子想要见我的
心声……
谁想了！
胡说八道！
恶心！
好了好了～


好了
这里是著名公司。
哼，不要紧……因为爹我只知道那个机密房间。公司不会倒闭吧？
这到底是怎么回事？


因为如果没有钱，你就不能做咖喱了！
笑眯眯


哼
是呀！


太过分了！
这两父子！

3 后　续

CPU之类的基本结构、逻辑电路的基本结构

硅之所以成为现代半导体产业的核心，是因为由晶体管组合而成的集成电路（IC）得以问世。

美国德克萨斯州仪器(Texas Instruments)公司的创始人之一杰克·基尔比（Jack Kilby）和英特尔公司的创始人之一罗伯特·诺伊斯(Robert Noyce)等取得了IC的专利。而且杰克·基尔比还因为这一构想于2000年获得了诺贝尔奖。

实际上，双极晶体管和FET都可以用来制作集成电路，并且也可以将双极晶体管和FET组合在一起制作集成电路（IC）。

相当于电脑“大脑”核心的部分就是被称为CPU（不仅是中央运算组件，而且还聚集了大量的记忆功能）的IC，它是由美国的英特尔、AMD等公司首先制造出来的。

以CMOS结构将P沟道FET和N沟道FET对称组合起来制作成逻辑电路，这就是用于CPU上的集成电路的制作方法。因为这种结构是P沟道和N沟道可以进行互补工作的结构，所以它含有使用了“互补性（complementally）”的MOSFET意思，从而被称作CMOS。

在此，我们以CMOS电路中最基本的电路结构为例来表示它的结构。

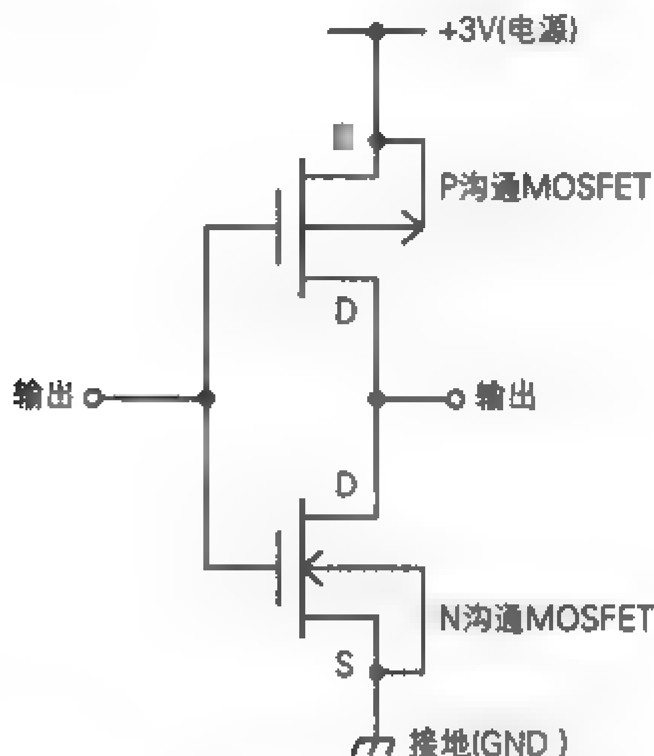
如图6-1所示，把P沟道和N沟道串联连接起来，把连接它们漏极的那一端看作输出端，连接它们栅极的那一端看作输入端。

如果输入端的电压与电源电压相同，P沟道FET就会处于OFF状态，N沟道FET就会处于ON状态。

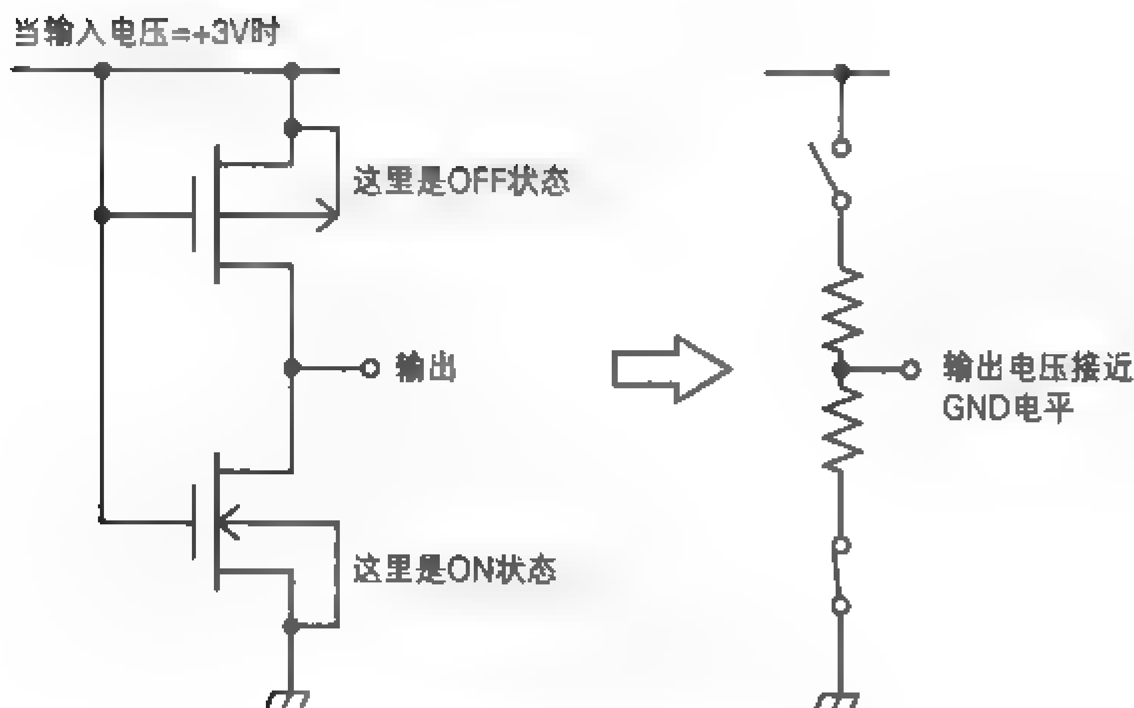
这样，输出电压就会接近GND电平（在没有输出电流的状态下，为0V）(图6-2)。

另外，如果输入电压与GND一样为0V，P沟道FET就会处于ON状态，N沟道FET就会处于OFF状态。

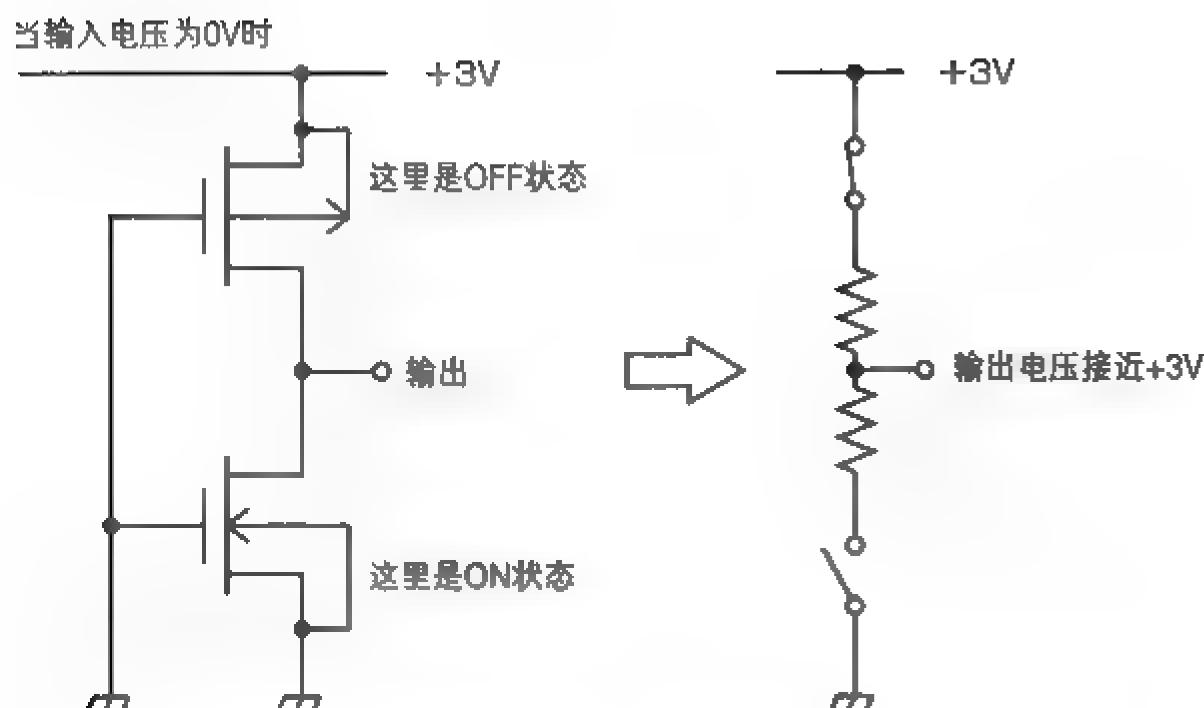
这样，输出电压就会接近电源电压（在没有输出电流的状态下，为电源电压）（图6-3）。



● 图6-1　CMOS结构的非门（NOT）电路

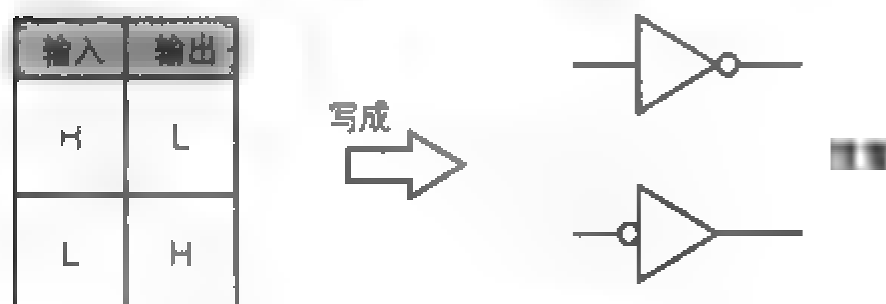


● 图6-2　在NOT电路中当输出电压=H时



● 图6-3 当输入电压为L时

之后的电路工作中，要将输入端和输出端的关系与逻辑电平中的“H”和“L”相对应(比如3V=H，GND=L)。



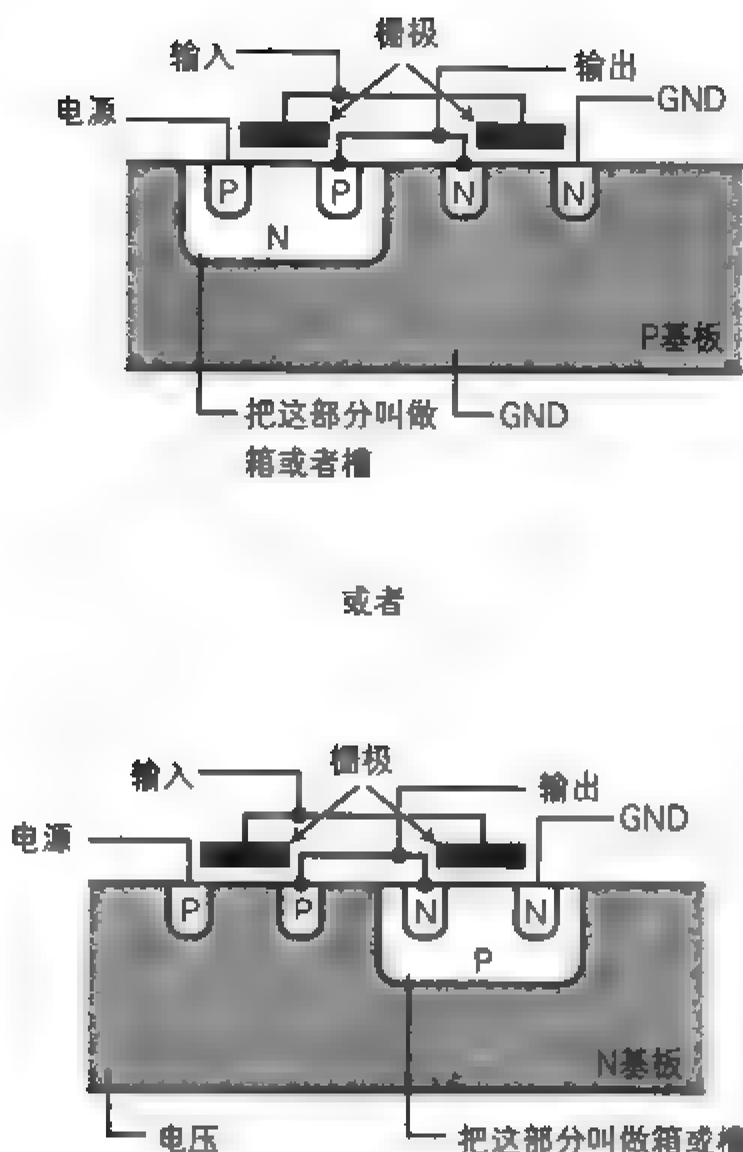
输入	输出
H	L
L	H

● 图6-4 NOT电路的符号

由此可以得到，输入端和输出端的关系如图6-4所示。

也就是说，如果把逻辑电平中的“H”和“L”换成这个电路的电源电压和GND电平，输入输出的逻辑电平关系就会反过来，即变成相反的关系。

这个电路在逻辑电路中叫做“反相(inverter）电路”（关于其电路符号，在IEEE和JIS中现在提倡用与在这里表示的电路符号不同的长方形来表述其逻辑功能，但是考虑到一般的普及状况，还是采用了旧的表示方法）。



● 图6-5 IC中的NOT电路（横截面图）

如图6-5所示，形成一个叫做箱（或槽）的区域，这样能够在一种硅基板中共同形成P沟道FET和N沟道FET。这样，在一块硅中制作出包含多个晶体管的集成电路成为可能。

在以前的IC发展史中，一直研究的如何缩短栅极的长度（在此图中用网状表示部分的左右的长度），并且如何使配线部分（在此图中用简单的细线条描述）更细密这项技术已经有了很大进步。到了2008年，在大约120mm²的空间大约可以容纳2.9亿个晶体管。

另外，单是通过反相并不能制作逻辑电路，作为逻辑电路的基本要素，重要的还有“与门（AND）”和“或门（OR）”。用逻辑电平将它们表示出来，结果如下表，同时还列出了其逻辑符号。



	输入A	
输出B	H	L
H	H	L
L	L	L

Y的状态

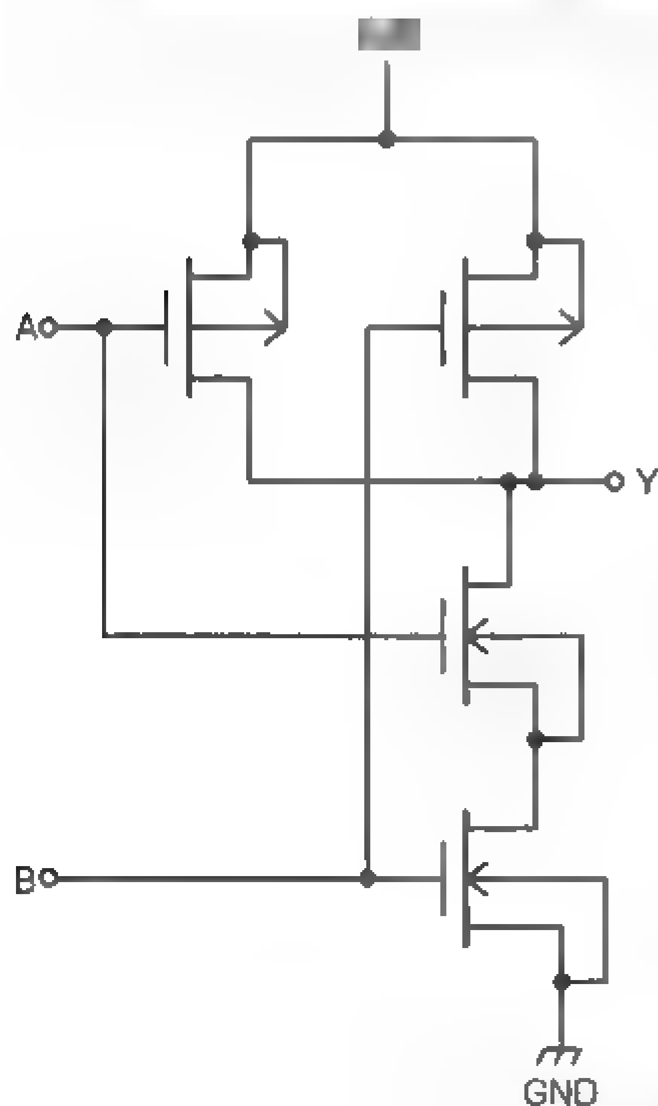


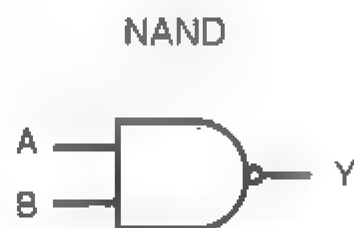
	输入A	
输出B	H	L
H	H	H
L	H	L

Y的状态

● 图6-6 AND电路和OR电路的符号

在制作CMOS电路时，将AND电路和OR电路的输出电压反相的电路结构——NAND电路和NOR电路的制作方法很简单。

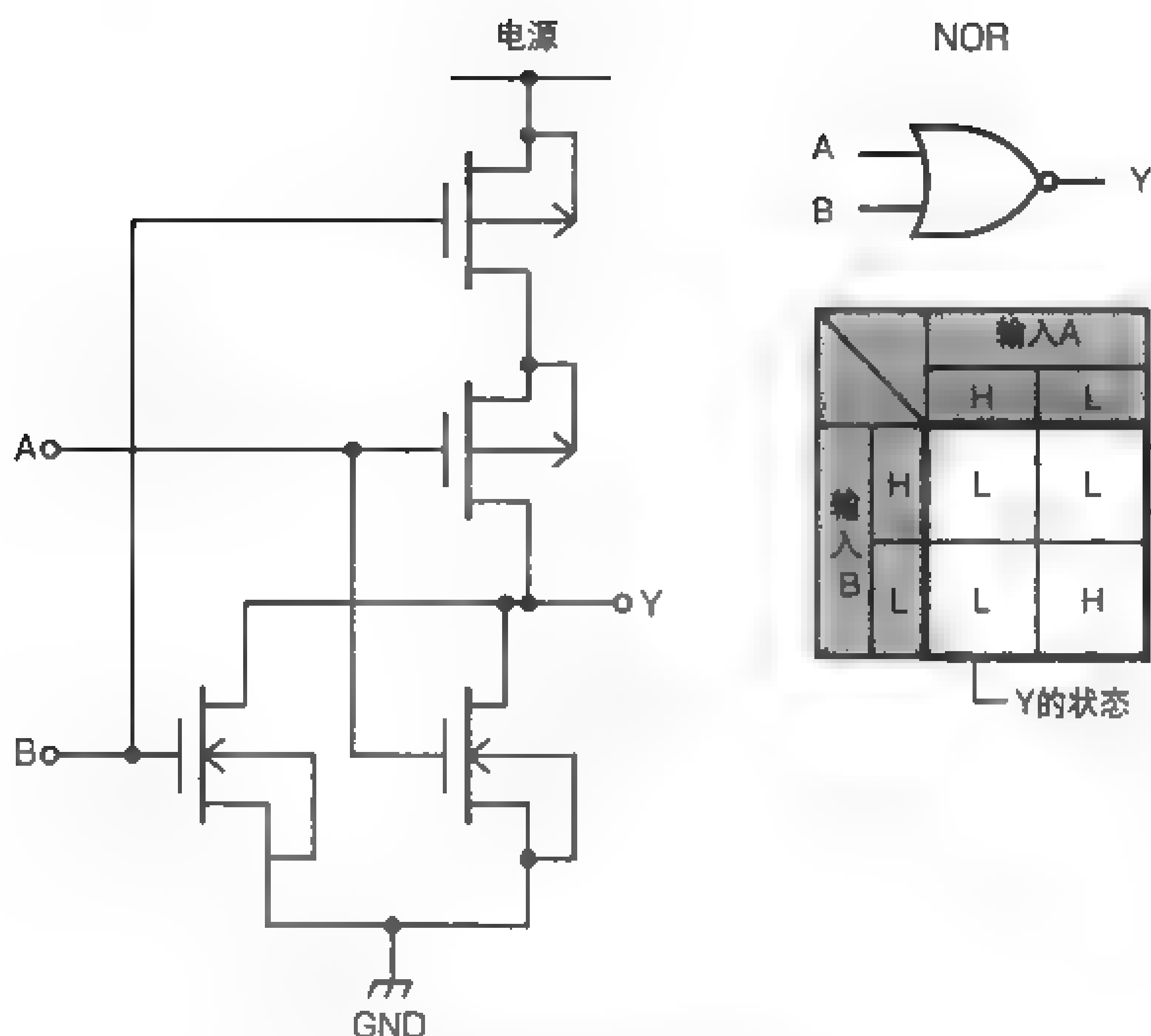




	输入A	
输入B	H	L
H	L	H
L	H	H

Y的状态

● 图6-7 CMOS结构的NAND电路



● 图6-8　CMOS结构的NOR电路

通过制作这样的电路，就能够制作出逻辑电路的基本要素。

在逻辑学中，AND、OR、NOT（INV=反相）是基本要素。在CMOS结构的逻辑电路中，作为基本要素也经常利用AND（与门）、OR（或门）、NOT(非门)（INV=反相）。

在此我们举的是两个输入端的例子，当然我们也可以将输入端的个数增加到3个甚至是4个。在那种状况下，增加串联或并联的N沟道FET和P沟道FET的个数，也可以制作出同样的结构。

逻辑集成电路（logic-IC）基本上就是由这些要素构成的。

在实际的电子电路中，除了逻辑电路外，还需要记忆元件（存储器）等。比如现在应用比较普遍的EFPROM，它能够在通电状态下记录数据，即使电源断开其记忆内容也不会消失。

这项技术被应用到了数码照相机存储卡和USB存储器中。

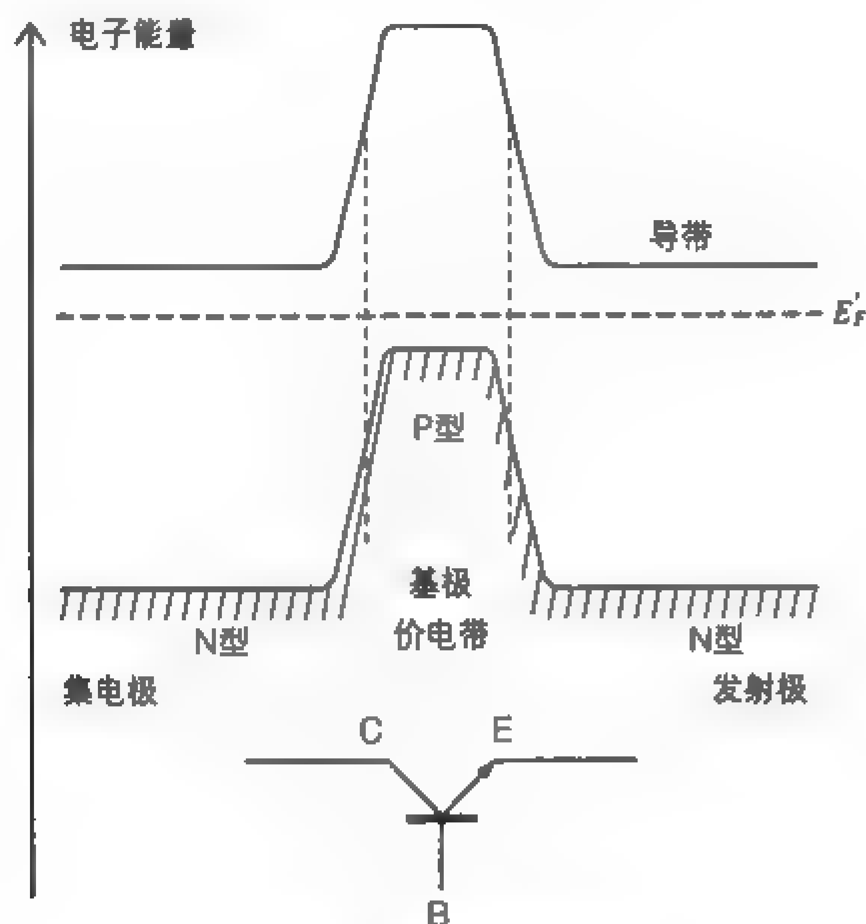
在IC中，不仅仅是逻辑电路，还有放大声音信号的放大器、构成电源电路、提高电源效率的IC等各种IC都被我们活用到我们身边的各种电子器材中。

在这些IC中，基本上使用的都是硅材料。

在本书中所介绍的硅的物理性质就是这样应用的根据。

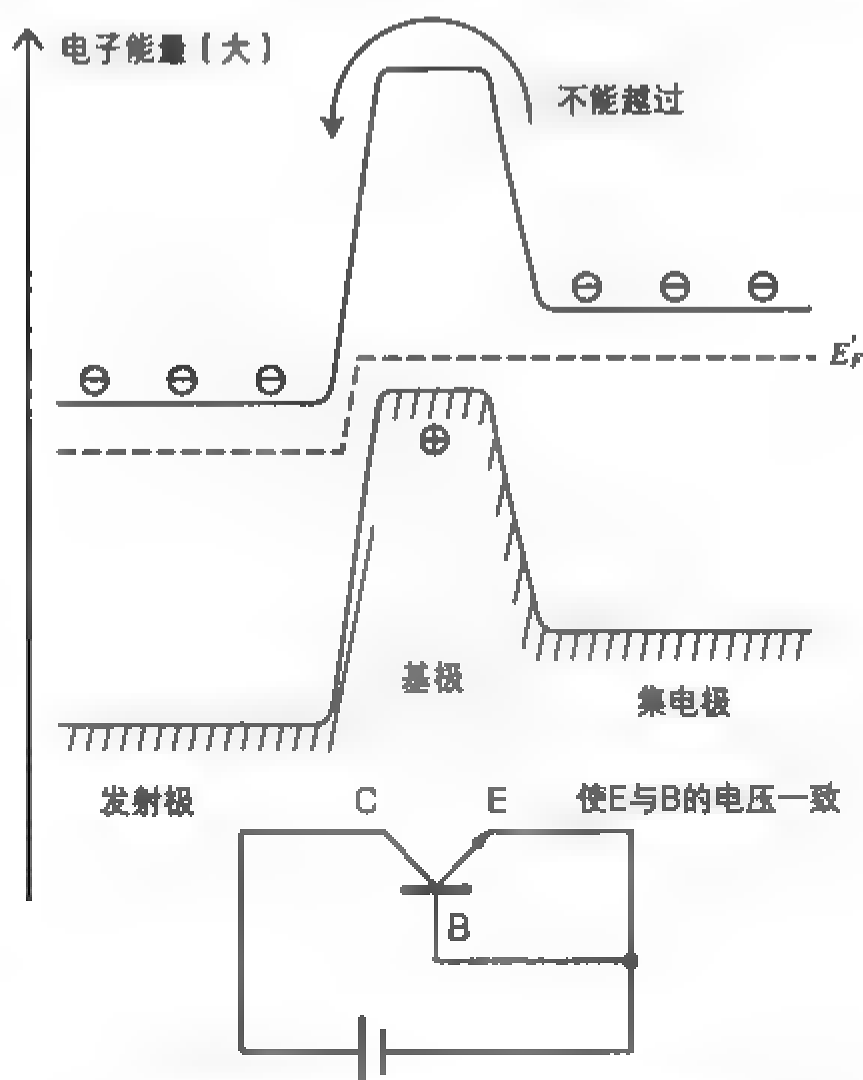
双极晶体管（NPN型）的工作概念

在考虑连接NP结（表示把PN结左右交替的状态）和PN结时，使P型区域变窄（图6-9）。



●图6-9 NPN型晶体管的能级

在NPN结上，以E（发射极）为基准，给C(集电极)施加正向电压。此时，事先要使B(基极)与E的电位相同。于是，集电极端的费米能级下降（从电子的角度来看，就是电子能量变低）（图6-10）。

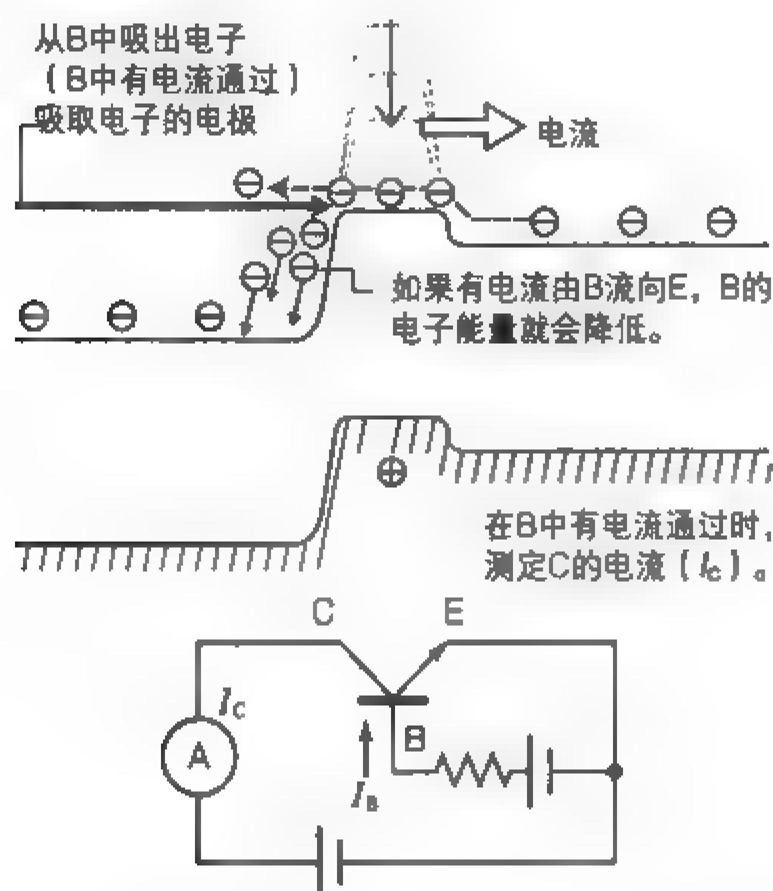


● 图6-10 给NPN晶体管施加电压时的能级

在这种状态下，费米能级处于不平衡状态，因此被称为准费米能级（E′）。

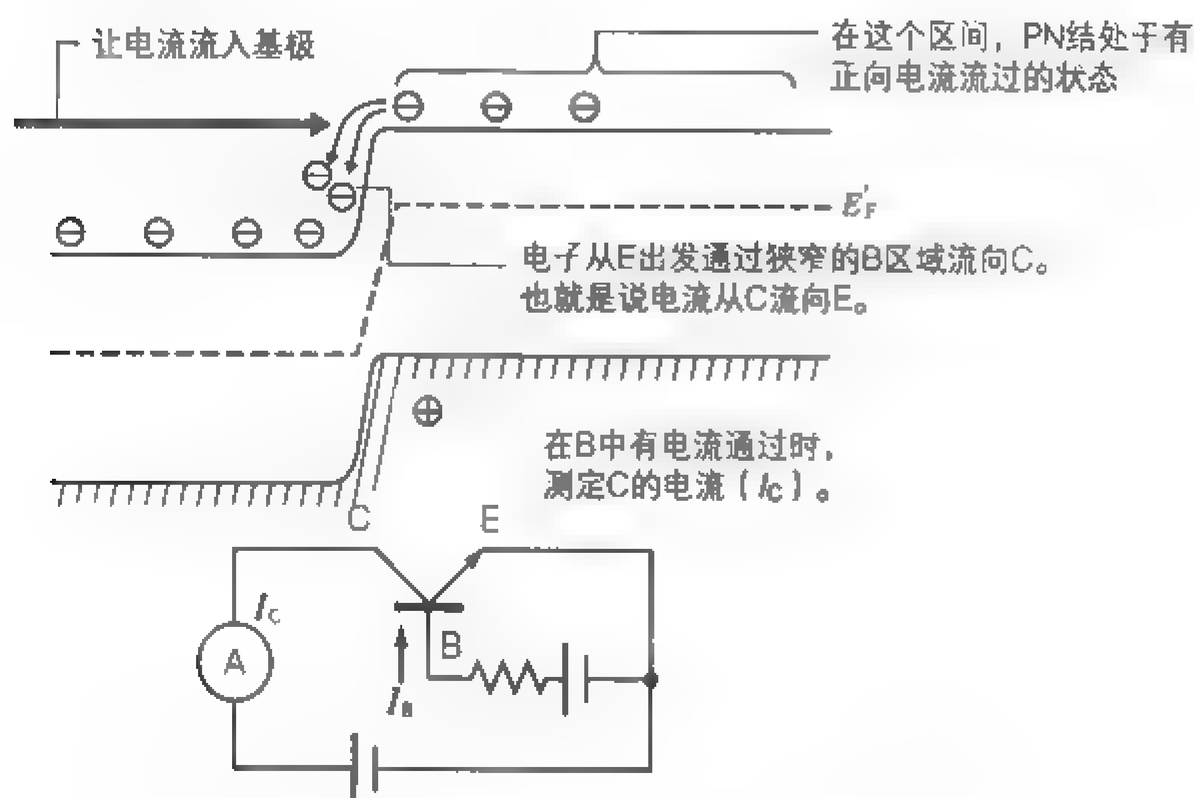
这样，虽然C的电位下降，但是因为有B区域的阻挡层，电子不能通过导带由E流向C。

接着，如果让B通过电流（如果制作 -个从B中吸出电子的电路），B的电子能量就会降低。换句话说，就是由B向E，有正向电流通过（图6-11）。



● 图6-11　给NPN施加电压同时让基极通过电流时

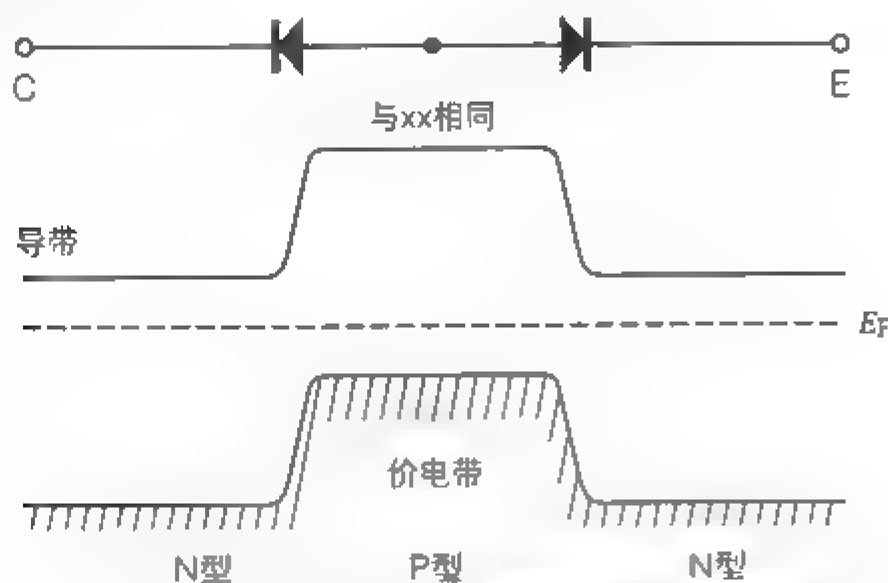
于是，电子就会从E出发通过B的狭小区域（与从B中抽出电子的电路不同），由E向C，电子逐渐减少。也就是说，电流会由C流向E。



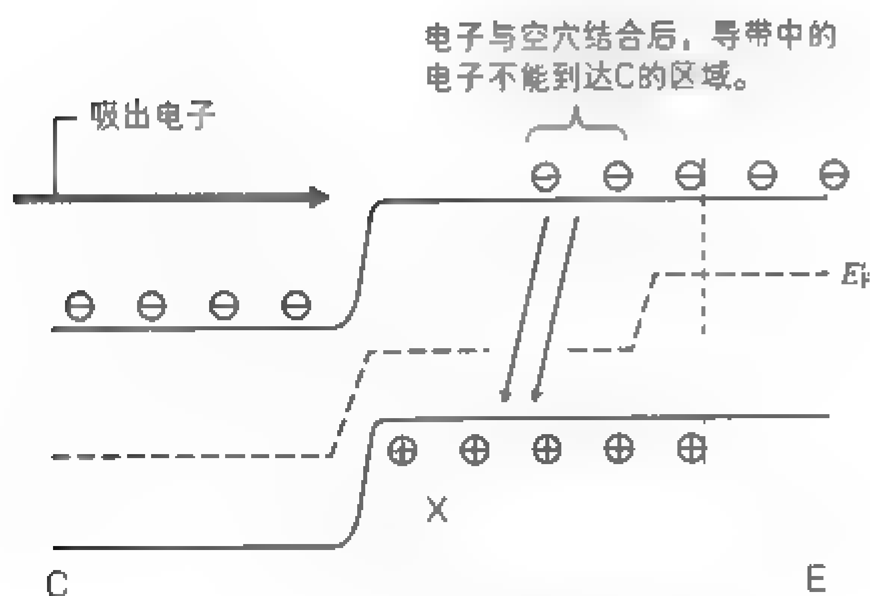
● 图6-12　比图6-11中更大的电流通过基极时

在此，如果P型区域变长后，结果会如何呢（图6-13）？

其结构就像是把两个PN二极管的阳极背对背地连接起来一样。如果将正中间的区域叫做X，让我们来考虑一下从X中吸出电子，降低X区域的电子能量时的状况（图6-14）。



● 图6-13　与把两个二极管连接起来的状态相同



● 图6-14　电子的再结合

X区域的电子能量降低，电子从E区域流出到X区域，也就是说会有正向电流从X区域流向E区域。

但是，如果X区域（P型）的距离较长的话，P型半导体导带中的电子会与

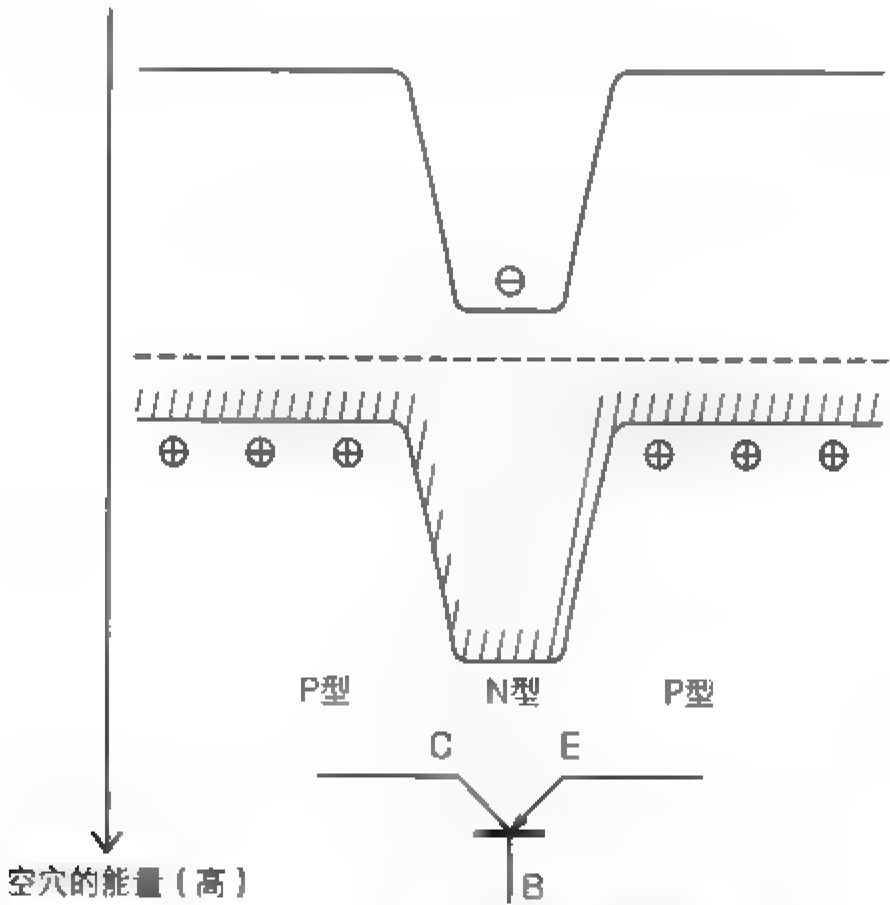
空穴结合，电子能量就会降低，一定时间后会处于平衡状态。我们将从E区域流出的电子与P型半导体中的空穴的结合叫做“电子与空穴的再结合”。

于是，从X区域落向C区域的电子数量几乎为0，在X与C之间不会产生电流。也就是说，C与X的状态与PN结的反向接续状态相同。

当晶体管为NPN型晶体管时，如果把X区域变窄，电子和空穴再结合的几率就会很小，这样在E和C之间就会产生电流。这就是B区域变窄的原因。

根据之前的说明，可能很难想象到大约相当于基极电流100倍的电流会从C流向E。不过，实际上通过轻微的电流就能够使B区域的电子能量降低，所以请大家想象一下大量的电子像瀑布一样从E落向C时的情景。因为再进一步地定量分析说明这个话题就会超出本书的范畴，所以有关晶体管的知识就介绍到这种程度。

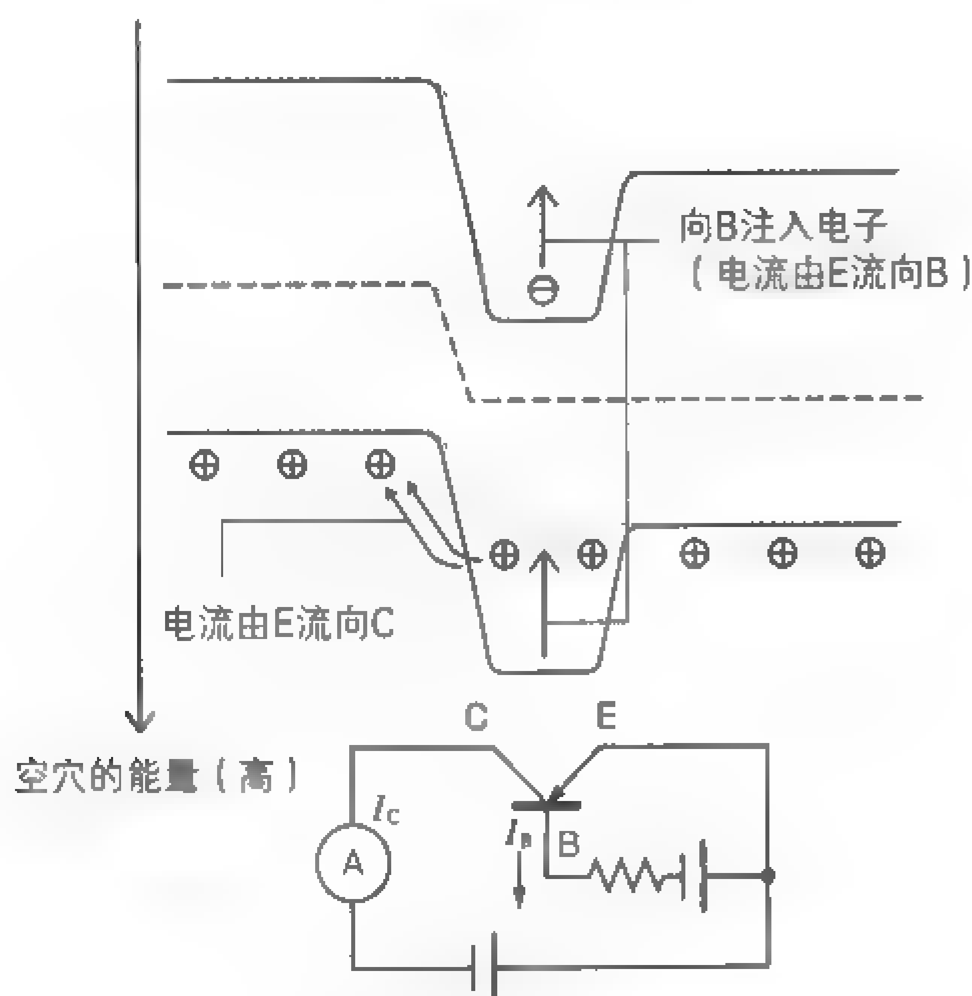
另外，当晶体管为PNP型晶体管时，就可以将上述说明中所出现的“N型”和“P型”互换，并且将“电子”和“空穴”互换，将施加电压的极性（“正极”和“负极”）反过来，把“从B中吸取电子”换为“向B中注入电子”，可以将坐标图中纵轴所表示能量看作电子能量(图6-15)。



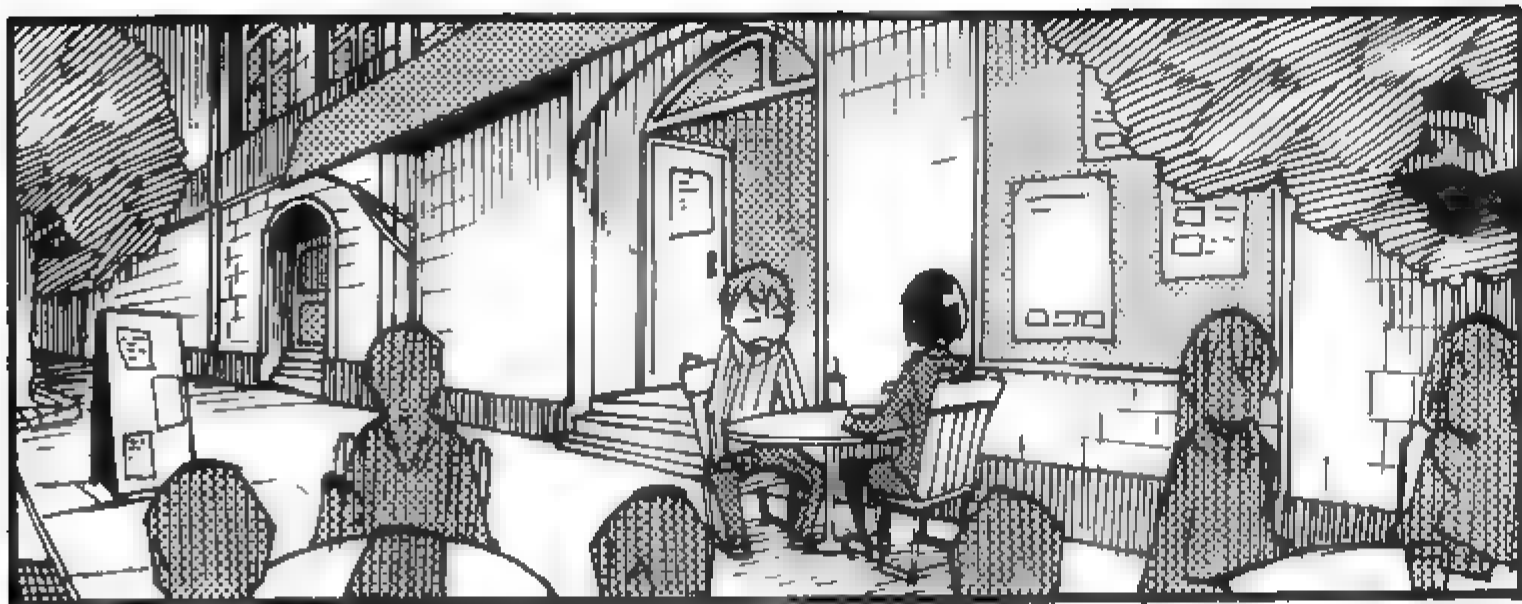
● 图6–15 PNP型晶体管的能级

于是，向基极注入电子，也就是电流由E流向B，B部分的阻挡层（从空穴来看）的能量会降低，与NPN型晶体管时的状况类似，这次空穴会像瀑布一样流向C(图6-16)。

这就是PNP型晶体管中的电流流动方式。



● 图6-16 让电流从PNP型晶体管基极通过时




我父亲让我向你说声谢谢，多亏了你，
我们父子才又和好如初！


哈哈哈！
我虽然是个间谍，但是什么都没有偷到！


我之前给你的那个盒子，还在吗？


实际上……
已经打开啦！
果然！
嘎吱

给我电影票？
约会的方法也太老土了吧？

什么呀！

那是佣人辞职后的保险！
如果佣人辞职了，我就吃不到咖喱饭了！

呵呵！♡

那么，

是不是因为想吃咖喱饭才和我交往的？♡

胡说什么啊！

原来如此！
果真如小丰爸爸所说的一样。

！？

哈哈

难怪最近和我不太亲近，原来只是想吃咖喱饭了！

那么，我做给你吃吧！

呵

什么？

你说什么？
怎么会突然出现在这里！
你是谁？

我是小丰的朋友！
我说要给他做咖喱饭！




笨蛋！
并不是说做就能做好咖喱饭的。


小丰的爸爸分析了你做的咖喱饭所用的材料并做成了食谱，他已经将做法教给了我！
妈妈的咖喱饭食谱
秘方


什么？
你父亲到底在干什么！

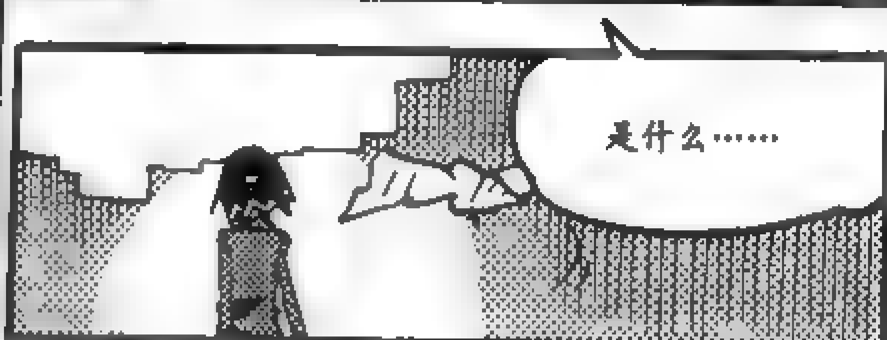

芽衣
等等我！！
太过分了……
郁闷
我们一起去游乐园吧！小丰！
我觉得电影更好！
我……
我的价值已经……


我真的很感谢你！真的……
咕咕


真的希望和你在一起！


咕咕
！？

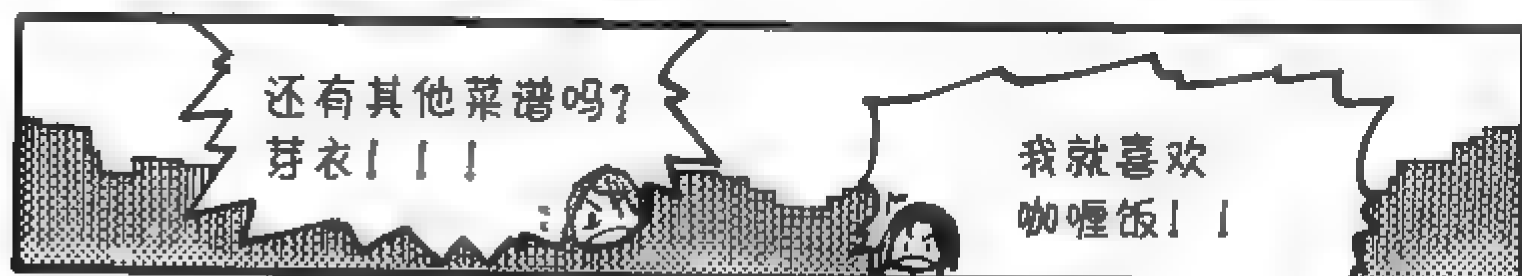

怎么会有信鸽……


是什么……


很遗憾，我要去学其他的咖喱菜谱，一定要等我！
咖喱炒饭之类的……
咕咕


哦！




还有其他菜谱吗？芽衣！！！
我就喜欢咖喱饭！！

元素周期表

族 / 周期	I_A	II_A	III_B	IV_B	V_B	VI_B	VII_B	VI	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1 H 氢 1.008								
2	3 Li 锂 6.941	4 Be 铍 9 012							
3	11 Na 钠 22.99	12 Mg 镁 24 31							
4	19 K 钾 39.10	20 Ca 钙 40 08	21 Sc 钪 44.96	22 Ti 钛 47 87	23 V 钒 50.94	24 Cr 铬 52.00	25 Mn 锰 54 94	26 Fe 铁 55 85	27 C 钴 58.
5	37 Rb 铷 85 47	38 Sr 锶 87.62	39 Y 钇 88 91	40 Zr 锆 91 22	41 Nb 铌 92.91	42 Mo 钼 95.94	43 Tc 锝 (99)	44 Ru 钌 101.1	45 R 铑 10
6	55 Cs 铯 132 9	56 Ba 钡 137.3	57~71 镧系元素 *	72 Hf 铪 178.5	73 Ta 钽 180 9	74 W 钨 183.8	75 Re 铼 186.2	76 Os 锇 190.2	77 铱 19
7	87 Fr 钫 (223)	88 Ra 镭 (226)	89~103 锕系元素 *,*	104 Rf 铲 (261)	105 Db 钍 (262)	106 Sg 镱 (263)	107 Bh 铍 (264)	108 Hs 镙 (265)	109 钅 (26

原子序号 → 3 Li ← 元素符号
锂 ← 元素名称
原子量 → 6.941

现在都是用阿拉伯数字来表示"族"中的1族到18族。但是，正如书中所写，因为罗马数字的表示方法已经在半导体产业中被普及运用，所以在此表中也用罗马字母标示出了以前的"族"号。
在此表中，附在族号后的A（非过渡金属）和B（过渡金属）是为了区分过渡金属和非过渡金属的符号，采用了1972年的表示方法。
并且，现在，氢不属于任何一族，只是给它分配了一个阿拉伯数字"1"作为它的族号，并且给稀有气体也分配了阿拉伯数字"0"作为它们的族号。

镧系元素	57 La 镧 138.9	58 Ce 铈 140.1	59 Pf 镨 140.9	60 Nd 钕 144.2	61 Pm 钷 (147)	62 S 钐 15
锕系元素	89 Ac 锕 (227)	90 Th 钍 232.0	91 Pa 镤 231.0	92 U 铀 238.0	93 Np 镎 (237)	94 钚 (23

	I$_A$	II$_B$	III$_A$	IV$_A$	V$_A$	VI$_A$	VII$_A$	稀有气体
10	11	12	13	14	15	16	17	18
								2 He 氦 4.003
			5 B 硼 10.81	6 C 碳 12.01	7 N 氮 14.01	8 O 氧 16.00	9 F 氟 19.00	10 Ne 氖 20.18
			13 Al 铝 26.98	14 Si 硅 28.09	15 P 磷 30.97	16 S 硫 32.07	17 Cl 氯 35.45	18 Ar 氩 39.95
8 Ni 镍 58.69	29 Cu 铜 63.55	30 Zn 锌 65.39	31 Ga 镓 69.72	32 Ge 锗 72.64	33 As 砷 74.92	34 Se 硒 78.96	35 Br 溴 79.90	36 Kr 氪 83.80
6 Pd 钯 106.4	47 Ag 银 107.9	48 Cd 镉 112.4	49 In 铟 114.8	50 Sn 锡 118.7	51 Sb 锑 121.8	52 Te 碲 127.6	53 I 碘 126.9	54 Xe 氙 131.3
78 Pt 铂 195.1	79 Au 金 197.0	80 Hg 汞 200.6	81 Tl 铊 204.4	82 Pb 铅 207.2	83 Bi 铋 209.0	84 Po 钋 (210)	85 At 砹 (210)	86 Rn 氡 (222)
10 Ds 鐽 (269)	111 Rg 轮 (272)	112 (277)	113 (278)					
3 Eu 铕 152.0	64 Gd 钆 157.3	65 Tb 铽 158.9	66 Dy 镝 162.5	67 Ho 钬 64.9	68 Er 铒 167.3	69 Tm 铥 168.9	70 Yb 镱 173.0	71 Lu 镥 175.0
5 Am 镅 (243)	96 Cm 锔 (247)	97 Bk 锫 (247)	98 Cf 锎 (251)	99 Es 锿 (252)	100 Fm 镄 (257)	101 Md 钔 (258)	102 No 锘 (259)	103 Lr 铹 (260)

在本表中所表示的原子量是把IUPAC（国际纯粹与应用化学联合会）提供的值四舍五入后保留了4位有效数字后得到的结果。

参考文献

[1] ポール・ストラザーン　著　寺西のぶ子　監訳　稲田あつ子他　共訳『メンデレーエフ元素の謎を解く』（バベル・プレス）2006 年

[2] 伊達宗行　著『新しい物性物理』（講談社）2005 年

[3] 桜井広　著『元素 111 の新知識』（講談社）1997 年

[4] 伊豆原弓　著『HP ウエイ　－シリコンバレーの夜明け－　D・パッカード自伝』（日経 BP 出版センター）1995 年

[5] チャールス・キッテル　著　宇野良清他　共訳『キッテル固体物理学入門（第 8 版）』（丸善）2005 年
ハードカバーで 1 冊になったものと、上・下分冊になった上製本版が出ている

[6] 小川智哉　著『結晶光学の基礎』（裳華房）1998 年

[7] 月花靖雄　著『改訂　電子素子　半導体デバイス入門』（学献社）1995 年

[8] 国立天文台編『理科年表』（丸善）

我学会了做印度咖喱饭！

寄信地：印度　芽衣





（TN-1055.0101）
责任编辑：张丽娜　赵丽艳
责任制作：董立颖　魏　谨
封面制作：许思麒

用漫画这种形式讲数学、物理和统计学，十分有利于在广大青少年中普及科学知识。

周恩来、邓颖超秘书，周恩来邓颖超纪念馆顾问
中日友好协会理事，《数理天地》顾问，全国政协原副秘书长

用漫画和说故事的形式讲数学，使面貌冷峻的数学变得亲切、生动、有趣，使学习数学变得容易，这对于提高全民的数学水平无疑是功德无量的事。

《数理天地》杂志社　社长　总编
"希望杯"全国数学邀请赛组委会 命题委员会主任
周国镇

用漫画的形式，讲解日常生活中的数学、物理知识，更能让大家感受到数学殿堂的奥妙与乐趣。

《光明日报》原副总编辑
[illegible]文化研究会 常务副会长
鲁谆

科学漫画是帮助学习文科的人们用形象思维的方式掌握自然科学的金钥匙。

[illegible]大学外语学院日语专业 主任
大学日语教学研究会 会长
成同社

在日本留学的时候，我在电车上几乎每次都能看到很多年轻的白领看这套图书，经济实惠、图文并茂、浅显易懂，相信这套图书的中文版也一定会成为白领们的手中爱物。

大连理工大学 能源与动力学院 博士 副教授

我非常希望能够在书店里看到这样的书：有人物形象、有卡通图、有故事情节，当然最重要的还有深厚的理工科底蕴。我想这样的书一定可以大大提升孩子们的学习兴趣，降低他们对于高深的理工科知识的恐惧感。

北京启明星培训学校 校长

书中的数学知识浅显实用，漫画故事的形式使知识贴近生活，概念更容易理解。

北京大学 数学科学学院 博士
张磊

科学出版社 东方科龙
http://www.okbook.com.cn
zhaoliyan@mail.sciencep.com

上架建议：科普/漫画
ISBN 978-7-03-029093-9



定价：32.00元